

Fabrico de Componentes Compósitos Aeronáuticos através de Processos *Out-of-Autoclave*

Ricardo da Silva Santos

Dissertação de Mestrado

Orientador FEUP: Prof. Dr. António Torres Marques



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

junho 2017

Aos meus pais

Resumo

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito da dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O foco deste trabalho contextualiza-se na área dos processos de fabrico *Out-of-Autoclave*, nomeadamente dois processos de Infusão de Resina: o processo de Infusão de Resina e o processo de Infusão CAPRI.

Este estudo deveu-se à implementação de um novo processo de fabrico de um T-Rigidificador, num processo OoA. Visa produzir este componente de uma só vez e a eliminação de etapas de pós processamento, que levam a custos e tempos de produção bastante elevados. Estes custos necessitam de ser minimizados devido ao franco crescimento do setor aeronáutico e a limitações ambientais, derivadas de determinados processos utilizados atualmente.

No Laboratório de Materiais Compósitos do INEGI foi realizada uma pré-avaliação do novo processo de fabrico através da produção de placas de dimensões *standard* em epóxi/fibra de vidro, com 16 camadas, orientação 0/90° pelos processos anteriormente referidos. Realizaram-se ensaios de queima dos laminados produzidos, nos quais se verificou um maior teor de volume de fibra nas amostras do processo de Infusão CAPRI, tal como era esperado.

Com recurso ao software de simulação LIMS foram realizadas diversas simulações tendo em conta os valores de permeabilidade retirados da análise da frente de resina dos procedimentos experimentais realizados.

Palavras-chave: Materiais Compósitos, Infusão de resina, testes de queima, permeabilidade, teor em volume de fibras, teor em volume de vazios, CAPRI

Manufacturing of Aeronautical Composite Components Through Out-of-Autoclave Processes

Abstract

This work was developed in the context of the dissertation of Integrated Masters in Mechanical Engineering, in Faculty of Engineering of the University of Porto. The focus of this work is contextualized in Out-of-Autoclave manufacturing processes, two processes of Resin Infusion: The Resin Infusion process and CAPRI Infusion Process.

This study was developed for the implementation of a new manufacturing process of a T-Stiffener in an OoA process. It aims the production of this component at once and eliminate post-processing steps, which lead to a very high cost and production time. These costs need to be minimized due to the rapid growth of the aeronautical sector and the environmental limitations resultant from certain processes used.

In the INEGI Composite Materials Laboratory, was carried out a pre-evaluation of the new manufacturing process through the production of standard plates in epoxy / glass fiber, with 16 layers and 0/90 ° orientation by the previously mentioned processes. Burning-off tests were carried out on the laminates produced, in which a higher fibre content was found in the samples of the CAPRI Infusion Process, as expected.

Using the LIMS simulation software, several simulations were carried out, considering the permeability values obtained from the resin front analysis of the experimental procedures performed.

Keywords: Composite Materials, Resin Infusion, burn-off tests, permeability, fibre volume fraction, void volume, CAPRI

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Doutor António Torres Marques pela disponibilidade, pelos conselhos e por me ter dado a oportunidade de realizar este projeto.

Ao Pedro Mimoso por toda a paciência que teve para me orientar e por todo o conhecimento que me transmitiu durante este projeto.

Aos funcionários do Laboratório de Materiais Compósitos do INEGI, especialmente à Joana, por todo o interesse demonstrado neste projeto e pela ajuda que me deram.

Aos meus pais, à minha avó e a toda a minha família por todo o apoio, por toda a paciência e por terem estado sempre do meu lado.

Aos meus amigos: ao Nelson, à Isabel, à Sara, à Juliana e à Tatiana quero agradecer todo o apoio e toda a força que me deram para concluir esta etapa do meu percurso académico.

Aos meus colegas de faculdade, que considero também grandes amigos, o Tommy, o Jorge, o João e o Tiago por todo o interesse e pelos bons momentos que partilhamos juntos ao longo desta caminhada.

A todos os elementos do Grupo de Jovens de Nogueira da Regedoura e ao Grupo de Acólitos, quero agradecer todos os bons momentos que passamos juntos, as partilhas entre grupo, as experiências, todas as jornadas que passamos juntos e que contribuíram para me tornar a pessoa que sou hoje.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Motivação do Projeto	1
1.2	Apresentação da Entidade Promotora	2
1.3	Objetivos do Projeto	3
1.4	Estrutura da Dissertação	5
2	Estado da Arte	7
2.1	Compósitos na Aviação	7
2.2	T-Rigidificador	9
2.3	Processos <i>Out-of-Autoclave</i>	11
2.4	Seleção dos Materiais	23
2.5	Permeabilidade	24
3	Metodologia	29
3.1	Análise do teor em volume de vazios VV	29
3.2	Análise do teor em volume de fibras FVF	31
3.3	Análise da Frente de Fluxo	33
4	Trabalho Experimental	37
4.1	O Processo de Infusão	37
4.2	Equipamento Necessário	42
4.3	Preparação de uma Infusão Simples	45
4.4	Preparação de uma Infusão CAPRI	49
5	Optimização do Processo VARTM para o Demonstrador T-Rigidificador	53
5.1	<i>Software</i> de Simulação	53
5.2	Placa <i>Standard</i>	54
5.3	T-Rigidificador (<i>T-Stiffener</i>)	55
6	Análise de Resultados	57
6.1	Teor Aparente do Volume de Fibras	57
6.2	Resultados dos Ensaio de Queima	58
6.3	Frente de resina	61
6.4	Simulação da Injeção	64
7	Conclusões	79
7.1	Trabalhos Futuros	80
	REFERÊNCIAS	81
	ANEXO A: Ficha da Resina Utilizada	85
	ANEXO B: Resultados dos Procedimentos Experimentais	87
	ANEXO C: Resultados dos Ensaio de Queima	89

Siglas

AFP - Automated Fibre Placement

ASTM - American Society for Testing and Materials

CAPRI - Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion

CRTM – Compression Resin Transfer Moulding

FVF - Fibre Volume Fraction

FWF - Fibre Weight Fraction

LCM - Liquid Composite Moulding

LIMS - Liquid Injection Moulding Simulation

L-RTM – Light Resin Transfer Moulding

NCF - Non Crimp Fabric

OEM - Original Equipment Manufacturing

OoA - Out-of-Autoclave

RTM - Resin Transfer Moulding

SQRTM - Same Quality Resin Transfer Moulding

VAP - Vacuum Assisted Process

VA-RTM - Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding

VBO - Vacuum Bag Only

VV - Void Volume

Índice de Figuras

Figura 1.1 – INEGI (Sousa 2016)	2
Figura 1.2 – Dimensões e geometria do painel T- Rigidificado	3
Figura 1.3 - Esquema com as diversas etapas do projeto.....	4
Figura 2.1 - Evolução da utilização de compósitos na Airbus (Trilaksono and Watanabe 2014).....	7
Figura 2.2 - Materiais utilizados num Boeing 787 Dreamliner (ModernAirliners 2014) ..	8
Figura 2.3 - Componentes da estrutura da asa de uma aeronave (FAA 2012)	9
Figura 2.4 - Processo de fabrico do T-Rigidificador (Lensfeld et al. 2016)	10
Figura 2.5 - Processo de Pultrusão para fabrico do T-Rigidificador (Shinoda et al. 2007)	10
Figura 2.6 - Autoclave da Boeing (Batey 2010)	11
Figura 2.7 - Automated Fibre Placement (MTorres 2012)	13
Figura 2.8 - Esquema do processo RTM (Nuplex 2017)	14
Figura 2.9 - Sequência de fabrico do processo Compression RTM (JEC 2016)	16
Figura 2.10 - Estrutura de teto de helicóptero obtida pelo processo SQRTM (Black 2010)	17
Figura 2.11 - Esquema do processo VARTM (NetComposites 2017)	18
Figura 2.12 - Vista de topo da montagem do processo VARTM (Dhyani 2009)	18
Figura 2.13 - Membrana utilizada no processo VAP (JEC 2014)	20
Figura 2.14 - Comparação das etapas dos processos CAPRI e VARTM (Niggemann et al. 2008).....	21
Figura 2.15 - Esquema do processo CAPRI (Niggemann et al. 2008)	21
Figura 2.16 - Esquema do processo Double Bag (Waldrop 2008)	22
Figura 2.17 - Impregnação das fibras (Cerqueira 2008)	26
Figura 2.18 - Configurações para a medição da Permeabilidade (Cerqueira 2008)	26

Figura 3.1 - Metodologia utilizada para cálculo do FVF e VV	31
Figura 3.2 - Controlo da frente de resina durante uma infusão.....	33
Figura 3.3 - Exemplo de gráfico da frente de fluxo em função do tempo e respetiva frente de fluxo elevada ao quadrado (Alms et al. 2010)	34
Figura 4.1 - Equilíbrio de pressões num processo de Infusão (Correia 2004).....	38
Figura 4.2 - Diferenças na espessura entre os processos RTM e Infusão (Correia 2004).....	39
Figura 4.3 - Influência do processo de compactação (debulking) na espessura do empilhamento das fibras (Niggemann et al. 2008).....	40
Figura 4.4 - Zona de formação de canais rápidos no T-Rigidificador.	41
Figura 4.5 - Procedimento correto para colocar o saco de vácuo	45
Figura 4.6 - Ligação do equipamento antes de uma Infusão Simples.....	46
Figura 4.7 - Saco de vácuo corretamente realizado	46
Figura 4.8 - Ligação do equipamento durante uma Infusão Simples.....	47
Figura 4.9 - Ligação do equipamento para a cura uma Infusão Simples	48
Figura 4.10 - Ligação para o processo de compactação (debulking).....	49
Figura 4.11 - Ligação do equipamento antes de uma Infusão CAPRI.....	50
Figura 4.12 – Ligação do equipamento durante uma infusão CAPRI	51
Figura 4.13 - Ligação do equipamento para a cura uma Infusão CAPRI	51
Figura 5.1 – Variáveis de entrada (Input) e de saída (Output) para simulação no LIMS ..	53
Figura 5.2 - Malha da Placa Standard obtida no ABAQUS®.....	54
Figura 5.3 - Malha do T-Rigidificador obtida no ABAQUS®	55
Figura 6.1 - Esquema de corte das amostras para ensaios de queima.....	59
Figura 6.2 - Frente de resina dos diferentes laminados na Infusão Simples	61
Figura 6.3 - Frente de resina ao quadrado dos diferentes laminados na Infusão Simples.....	62
Figura 6.4 - Frente de resina dos diferentes laminados na Infusão CAPRI.....	62
Figura 6.5 - Frente de resina ao quadrado dos diferentes laminados na Infusão CAPRI ..	63
Figura 6.6 - Simulação da Placa Standard para o processo de Infusão Simples.....	65
Figura 6.7 - Simulação da Placa Standard para o processo de Infusão CAPRI.....	66

Figura 6.8 - Nós da malha com permeabilidade diferente para simulação do canal rápido

.....77

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação do Projeto

Indústrias como a automóvel, naval, aeroespacial, química, entre outras, têm utilizado cada vez mais os materiais compósitos, retirando o máximo proveito das propriedades destes materiais, especialmente quando são necessárias boas propriedades mecânicas aliadas com um baixo peso estrutural.

Companhias aéreas por todo o mundo encomendam cada vez mais aviões, exigindo mais e melhor tecnologia nas suas aquisições. Devido a este facto, a indústria aeronáutica está obrigada a procurar novas soluções em termos de inovação e tornar-se mais flexível, de forma a conseguir acompanhar este crescimento. Aí os materiais compósitos trouxeram um novo fôlego a esta indústria, pois tornaram possível introduzir inovação e flexibilidade que já estava no seu auge com a utilização das ligas metálicas.

A performance esperada num compósito não depende apenas da escolha da matriz e das fibras, mas também do processo de fabrico escolhido para a sua conceção. A presença de imperfeições durante a sua manufatura também é um detalhe a considerar. Enquanto que a matriz funciona como material ligante, as fibras conferem a resistência ao material compósito, tornando muito difícil a ocorrência de longas fendas no material. (Yancey 2012)

1.2 Apresentação da Entidade Promotora

Este projeto foi realizado no Laboratório de Materiais Compósitos do Instituto de Ciência e Inovação e em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI), que neste momento se apresenta como um dos principais polos de Inovação Tecnológica e Conhecimento Científico a nível nacional. Foi criado no ano de 1986, a partir do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) e do Departamento de Engenharia e Gestão Industrial (DEGI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).



Figura 1.1 – INEGI (Sousa 2016)

No Laboratório de Materiais Compósitos é possível desenvolver produtos com novos materiais compósitos, que poderão futuramente ser implementados nas empresas que fazem parceria com este centro de investigação. Este laboratório apresenta uma grande gama de equipamentos, o que permite fazer investigação para uma diversidade de indústrias, incluindo a aeronáutica e aeroespacial.

Apresenta como Missão: “Contribuir para o desenvolvimento da indústria e da economia em geral, através da inovação de base científica e tecnológica, garantindo ao mesmo tempo o desenvolvimento pessoal e profissional dos colaboradores e o enriquecimento do ensino superior” (INEGI 2011).

1.3 Objetivos do Projeto

Foi proposto, por parte da empresa EMBRAER, um estudo do processo de fabrico de um painel T-Rigidificado. Esta tese foi desenvolvida com a ajuda da operação POCI-01-0247-FEDER-017805 - FLEXCRAFT, cofinanciada pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) e Programa Operacional Regional de Lisboa (Lisboa 2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

Este componente é, geralmente, obtido pelo processo de Autoclave e o principal objetivo deste projeto é estudar um novo processo de fabrico *Out-of-Autoclave*, de forma a reduzir os custos de produção num componente obtido duma só vez.

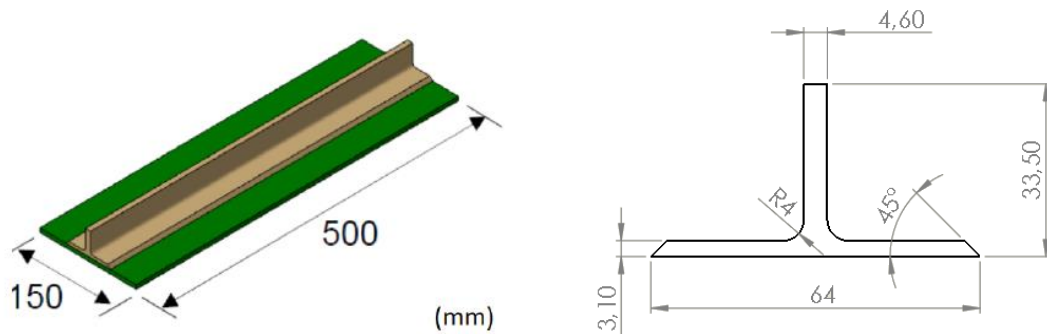


Figura 1.2 – Dimensões e geometria do painel T- Rigidificado

Um painel T-Rigidificado é normalmente composto pela pele (skin), a parte inferior, e pelo Rigidificador em “T”. O empilhamento do painel é feito da seguinte forma:

- Pele (skin) com a orientação (45/0/-45/90/45/0/-45/0)
- Rigidificador com a orientação (45/0/-45/90/-45/90/45/0/0/45/90/-45/90/45/0/-45)

Neste caso é um perfil em “T”, mas poderão haver outras configurações como os perfis em “I” ou então em “C”, dependendo da aplicação a que se destina o painel. Este tipo de componente está a ser cada vez mais utilizado, pois apresenta elevadas rigidez e resistência específicas (Jain 2009).

Para a implementação do novo processo de fabrico do painel, esta tese encontra-se dividida em duas partes. Na primeira parte são feitos procedimentos experimentais, utilizando

dois processos de Infusão de resina distintos: a Infusão Simples e um processo típico de aplicações aeronáuticas, o processo “*Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion*” - CAPRI, no qual são efetuados ciclos de compactação das fibras. Este processo de compactação (*debulking*) é essencial para aumentar o teor em volume de fibra (acima dos 60%) e reduzir o teor em volume de vazios (aproximadamente 1%), que são requisitos básicos para obtenção de componentes aeronáuticos. É realizada uma pré-avaliação dos ciclos de compactação para verificar se apresenta os resultados previstos para este processo. Posteriormente, serão realizados ensaios de queima para obter valores de teor de volume de fibras FVF e de vazios VV.

Na segunda parte é feita uma estimativa da permeabilidade do meio, com recurso ao controlo da frente de resina, feito através da filmagem da infusão. É também utilizado um programa de simulação de injeção de resina (LIMS), com o objetivo de validar o processo e os valores obtidos para a permeabilidade.

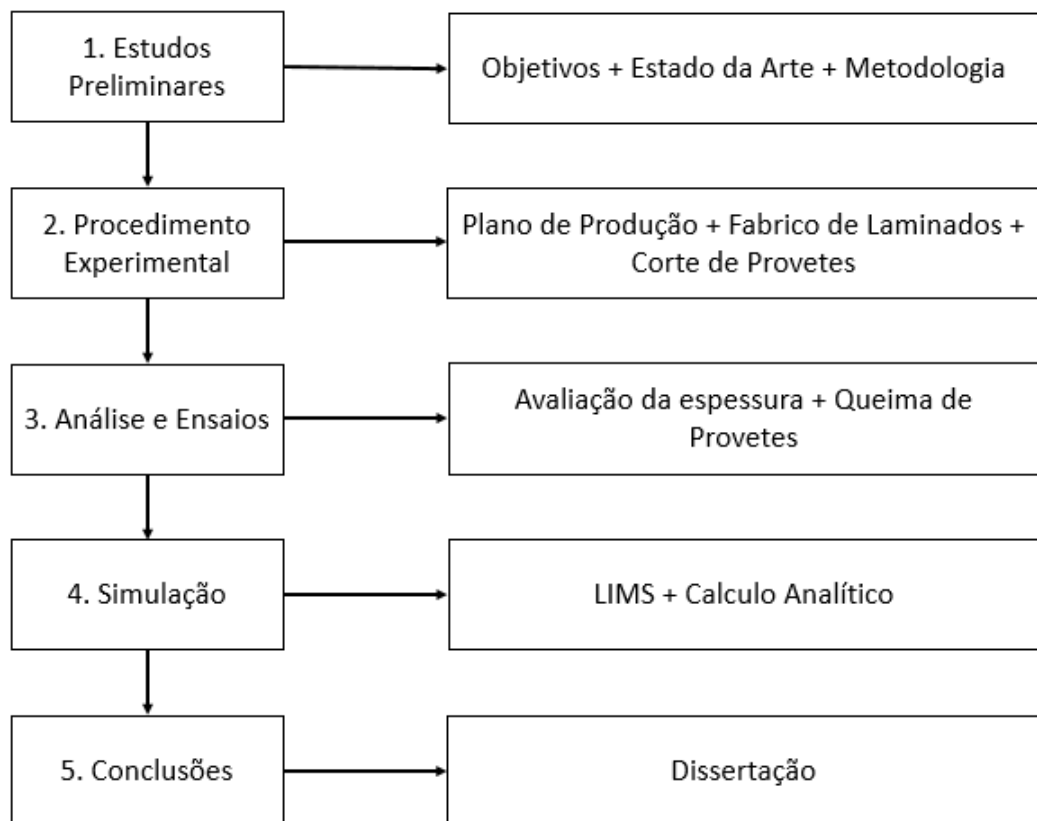


Figura 1.3 - Esquema com as diversas etapas do projeto

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em sete capítulos por forma a organizar coerentemente os conteúdos da mesma.

No Capítulo 2, é apresentada a importância estratégica que os materiais compósitos representam para a indústria aeronáutica e é feito também um resumo dos processos de fabrico OoA. A permeabilidade é também um assunto abordado e é dada a conhecer a sua importância na diversidade dos processos LCM.

No Capítulo 3, é apresentada a metodologia do projeto em que são dadas a conhecer diversas normas que permitem caracterizar os materiais compósitos.

No Capítulo 4, são apresentados os materiais necessários para realizar as infusões bem como os procedimentos para a realização das mesmas.

No Capítulo 5, é feita uma introdução ao programa de simulação utilizado: são apresentadas as leis em que se baseia o programa e as variáveis de entrada (*Input*) e de saída (*Output*).

No Capítulo 6, é feita a análise dos resultados obtidos após as infusões realizadas: é efetuada a comparação do FVF Aparente com os valores obtidos do FVF obtidos do ensaio de queima. Seguidamente são apresentadas as simulações efetuadas, quer para uma placa de dimensões *standard*, quer para o T-Rigidificador.

No Capítulo 7, são apresentadas as conclusões e os possíveis trabalhos a realizar em futuros projetos.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Compósitos na Aviação

Os metais são materiais suscetíveis à corrosão e também à fadiga, o que por diversas vezes se comprovou desastroso em inúmeros desastres aéreos. Os materiais compósitos tornaram-se bastante atrativos pois apresentam inúmeras vantagens comparativamente a outros materiais utilizados anteriormente, como as ligas metálicas. A sua rigidez específica elevada é uma das suas principais vantagens, e através do estudo da melhor orientação das fibras é possível obter laminados para diferentes aplicações, entre as quais se destaca a criação de estruturas de asa mais aerodinâmicas (Yancey 2012).

O dano num material compósito pode ser considerado como uma alteração na microestrutura que causa uma falha no comportamento estrutural do componente. Ao nível da matriz, a presença de porosidades, tais como vazios, é altamente influente podendo levar a potenciais pontos de delaminação e propagação de fendas. Quando sujeito a uma carga, a resposta do compósito depende essencialmente do nível de compactação das fibras (Potter 1997, Rudd, Long, and Kendall 1997).

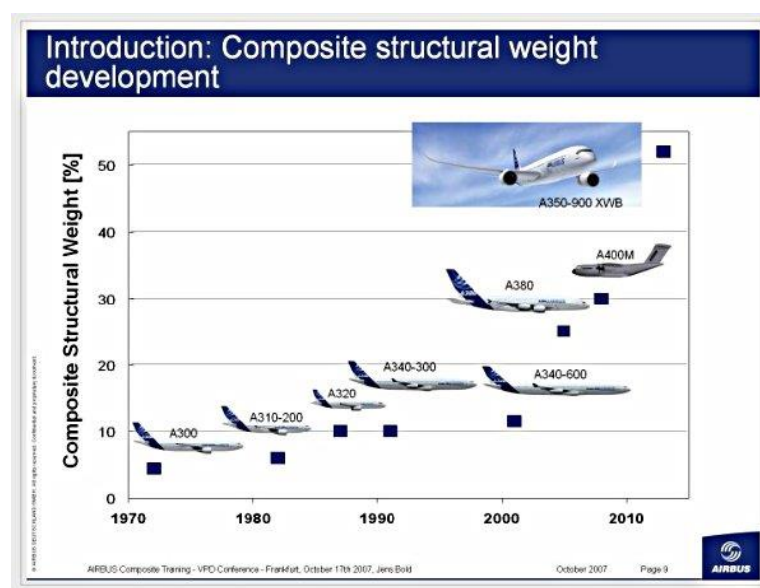


Figura 2.1 - Evolução da utilização de compósitos na Airbus (Trilaksono and Watanabe 2014)

Na figura 2.1, é possível verificar a evolução da aplicação de materiais compósitos, durante os últimos 40 anos nos aviões da Airbus, não apenas nos comerciais. É possível verificar, igualmente, na figura a presença de aeronaves militares, que foram o principal impulsionador dos materiais compósitos na aviação.

Desde a década de 1950 que os materiais compósitos têm vindo a desempenhar um papel fundamental no desenvolvimento da aviação. Passaram a ser cada vez mais utilizados, não só em pequenos componentes, mas também como parte estrutural dos aviões. Esta implementação foi feita de forma progressiva: inicialmente, apenas eram utilizados em componentes interiores; seguidamente, com o aparecimento da fibra de carbono, que veio substituir a fibra de vidro, passaram a ser utilizados nos *flaps* e lemes. Neste momento, os materiais compósitos são utilizados nas estruturas primárias das aeronaves, como estabilizadores, fuselagem e mesmo nas asas.

O Boeing 787 *Dreamliner* é considerado a nova revolução na indústria aeronáutica desde que foi introduzido o Boeing 707, um dos primeiros da aviação comercial, há cerca de 50 anos atrás. Na figura 2.2, é possível verificar que os materiais compósitos representam cerca de metade de todos os materiais existentes nesta aeronave, em que a fibra de carbono está presente em quase toda a estrutura. Foi possível reduzir o número de *fasteners* em mais de 40 000, devido a ser utilizada uma fuselagem como uma estrutura integral, em fibra de carbono, em vez da utilização de múltiplos painéis, o que também permite maiores pressões na cabine (ModernAirliners 2014).

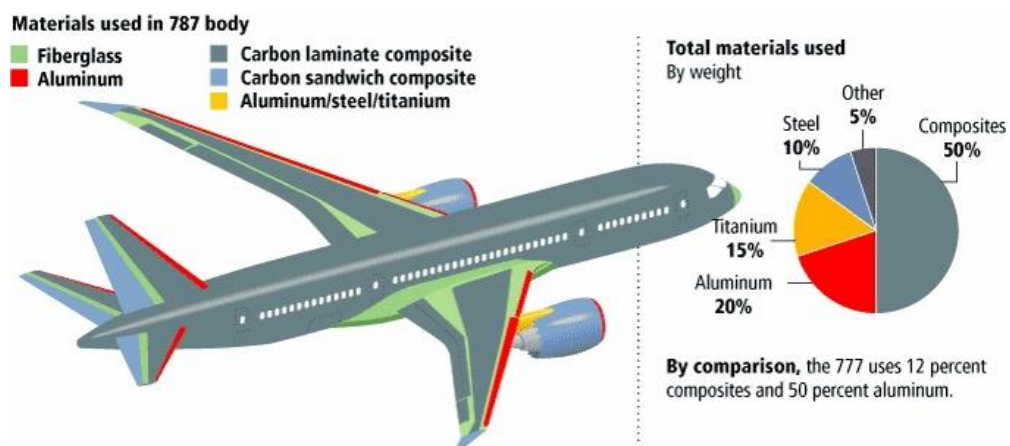


Figura 2.2 - Materiais utilizados num Boeing 787 *Dreamliner* (ModernAirliners 2014)

Neste momento, a indústria aeronáutica encontra-se em franco crescimento, é necessária, portanto, uma maior cadência de produção. Grandes empresas produtoras de aeronaves, como a Airbus e a Boeing têm vindo a ser as grandes inovadoras neste campo da Engenharia com a introdução de materiais compósitos na sua área de indústria. Também a Bombardier e a Mitsubishi têm desenvolvido pequenas aeronaves, destinadas a voos regionais.

2.2 T-Rigidificador

As asas têm grande importância na aerodinâmica de uma aeronave, já que, quando se move pelo ar, são as asas que geram a força de Sustentação. Considerando que todas as forças que atuam sobre a estrutura, quando a aeronave tem a intenção de descolar, a força resultante deve ser criada pela Sustentação.

O T-Rigidificador (*T-Stiffener* ou *Stringer*) é um dos elementos constituintes da asa, e tem o papel de conferir a rigidez necessária para que a asa possa criar sustentação necessária para a aeronave conseguir levantar voo. Geralmente, encontram-se posicionados na direção longitudinal da asa e prolongam-se em todo o seu comprimento. Na Figura 2.3, é possível verificar alguns dos principais constituintes da estrutura de uma asa de um avião.

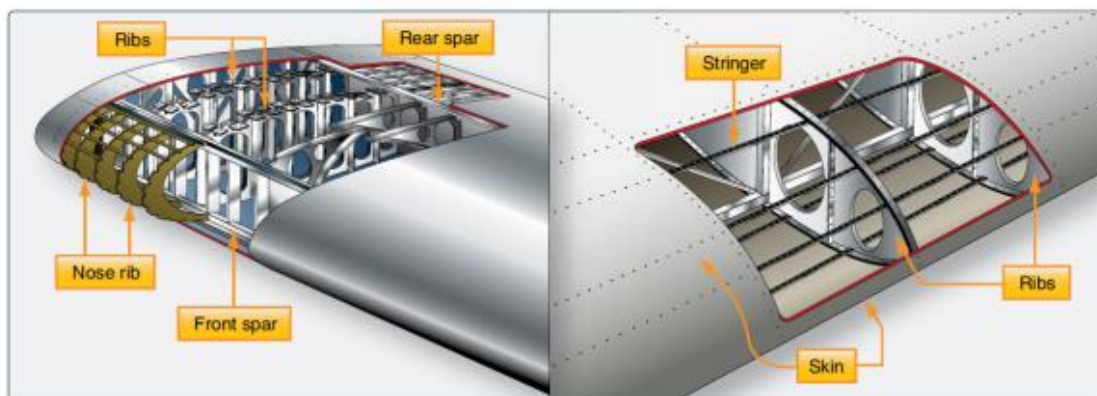


Figura 2.3 - Componentes da estrutura da asa de uma aeronave (FAA 2012)

Fabrico do componente

A forma mais comum de obter T-Rigidificador inicia com o empilhamento das diversas camadas de fibras sobre uma superfície plana e posteriormente conformadas a quente, num molde, em forma de “C”. Depois de obter esta configuração, a pré-forma é cortada a meio, de forma a obter dois “L” e seguidamente estas duas partes são unidas de forma a obter o Rigidificador, como se encontra descrito na Figura 2.4.

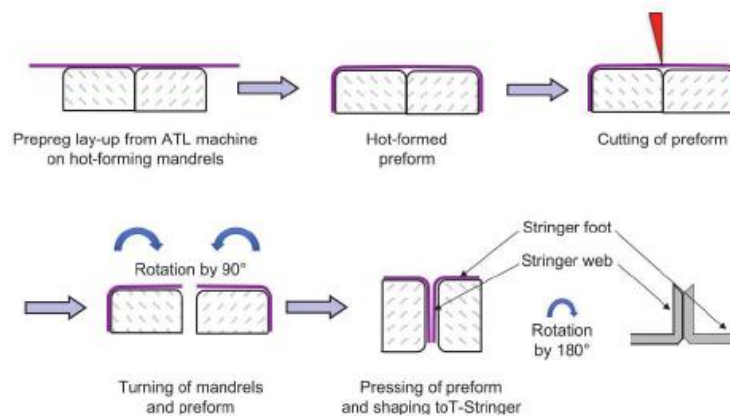


Figura 2.4 - Processo de fabrico do T-Rigidificador (Lensfeld et al. 2016)

A Mitsubishi desenvolveu um método avançado de fabrico de T-Rigidificador para os seus aviões regionais. A Figura 2.5 mostra este processo automatizado de produção de pré-formas que se assemelha ao processo de pultrusão e apresenta também inúmeras vantagens entre elas uma elevada cadência de produção, derivada do processo contínuo de conformação a quente, a qual pode chegar a atingir os 10 metros por hora (Shinoda et al. 2007).

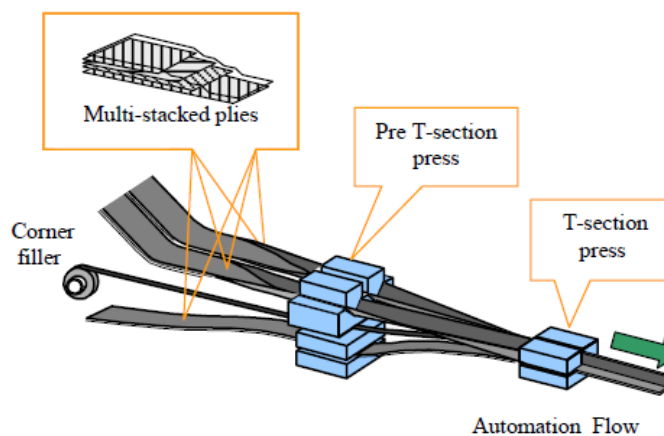


Figura 2.5 - Processo de Pultrusão para fabrico do T-Rigidificador (Shinoda et al. 2007)

2.3 Processos *Out-of-Autoclave*

A cura através do processo de autoclave foi durante largos anos considerada como a melhor opção para obter materiais compósitos devido à sua capacidade de obter componentes com elevado FVF (acima dos 50%) e um volume de vazios abaixo de 2% (Mason 2006). A sua qualidade superficial é também uma das suas principais vantagens.

No entanto, trata-se de um processo bastante dispendioso, e os custos inerentes a este processo têm vindo a ser questionados durante os últimos anos, nomeadamente os custos energéticos e de infraestruturas. Isto levou ao desenvolvimento de processos OoA, a partir dos quais é possível produzir componentes com a qualidade de autoclave, fora do autoclave. Foi, assim, possível minimizar os custos energéticos, de produção e permitiu também aumentar a flexibilidade da linha de produção (Ridgard 2009).



Figura 2.6 - Autoclave da Boeing (Batey 2010)

Seguidamente, serão apresentados alguns dos processos mais utilizados na área dos processos OoA, e que permitiram um grande avanço tecnológico no fabrico de produtos em materiais compósitos. São dados a conhecer os pré-impregnados VBO, as suas principais vantagens e algumas aplicações e também dois processos de LCM: o RTM e o VARTM, assim como também algumas das suas principais variantes.

2.3.1 VBO Prepregs

Os materiais pré-impregnados são fibras de reforço ou tecidos nos quais a resina foi impregnada numa tarefa de pré-processamento. Os constituintes da resina reagem muito lentamente à temperatura ambiente, dando origem a tempos de trabalho que podem durar entre vários dias a vários meses. Este tipo de materiais é, geralmente, curado em autoclaves. A cura é realizada a elevadas temperatura e pressão, de forma a garantir o fluxo de resina e eliminar as porosidades e vazios, a principal origem de defeitos dos materiais compósitos (Campbell 2003).

Este processo pode ser executado através do tradicional de colocação manual ou então através de métodos *Automated Fibre Placement* - AFP, que permitem uma produção mais precisa. A temperatura de cura destes *pré-impregnados* varia, geralmente, entre os 80°C e os 120°C, encontrando-se assim bastante abaixo da temperatura utilizada na cura em Autoclave, que ronda os 180°C.

Contudo, os *pré-impregnados* VBO permitem atingir VV muito semelhantes aos utilizados no processo de Autoclave, com consolidação através de uma cura convencional num simples forno. Asseguram também uma distribuição uniforme da resina, evitando zonas ricas em resina e pontos secos de resina, que são problemas bastante comuns nos processos de infusão.

2.3.2 Automated Fibre Placement - AFP

Este processo consiste na deposição automática de fibras: *pré-impregnados* termoendurecíveis ou termoplásticos e ainda fibras secas. Geralmente, um sistema automático coloca os *tows* em posição e direções pré-programadas, de forma a otimizar a estrutura em função das solicitações às quais está sujeita. Este sistema inclui diversos componentes, entre eles uma cabeça com um rolo de compactação, um braço robótico e também um sistema que permite a alimentação de fibras (Boisse 2015).

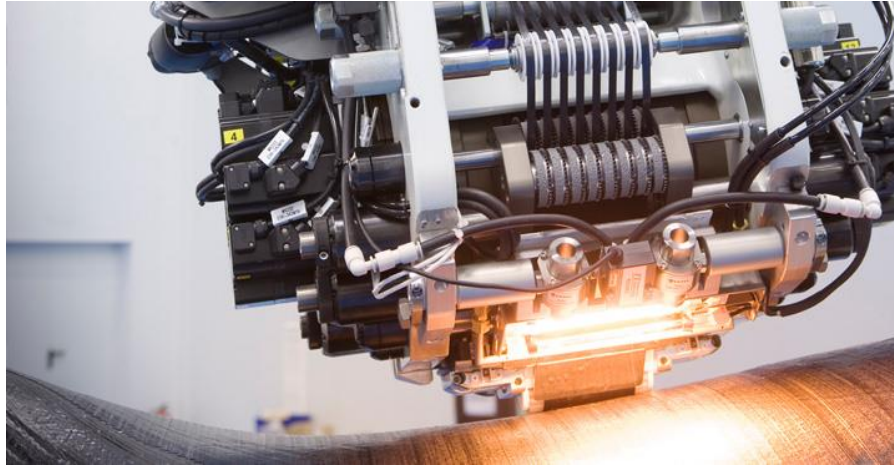


Figura 2.7 - *Automated Fibre Placement* (MTorres 2012)

Permite obter peças bastante complexas devido à utilização de um braço robótico, que ainda pode ser complementada pela movimentação do molde, o que irá permitir aumentar o número de graus de liberdade do sistema.

Com o aumento do tamanho dos componentes e o aumento das produções, tornou-se necessário desenvolver processos de fabrico automatizados, Através da técnica de AFP é possível inspecionar e controlar toda a produção durante o processo, economizando tempo e dinheiro (AirbusGroup 2016).

Com este processo, é possível obter uma grande produtividade face aos processos não automatizados e um grande aproveitamento do material, já que as fibras são cortadas à medida que a peça é completada até obter a forma pretendida. É, também, um processo que apresenta elevada repetibilidade, pois a disposição das fibras é programada antes da produção do componente, sendo, portanto, todos os componentes obtidos da mesma forma, eliminando assim variações e falhas por parte de operadores.

2.3.3 Resin Transfer Moulding - RTM

O processo de *Resin Transfer Moulding* é um dos mais utilizados e um dos mais fiáveis na indústria para fabrico de componentes em materiais compósitos; principalmente devido à sua capacidade de produção de componentes com geometrias complexas. No entanto, é um processo relativamente caro, pois é necessária a existência de dois moldes (Laurenzi and Marchetti 2012).

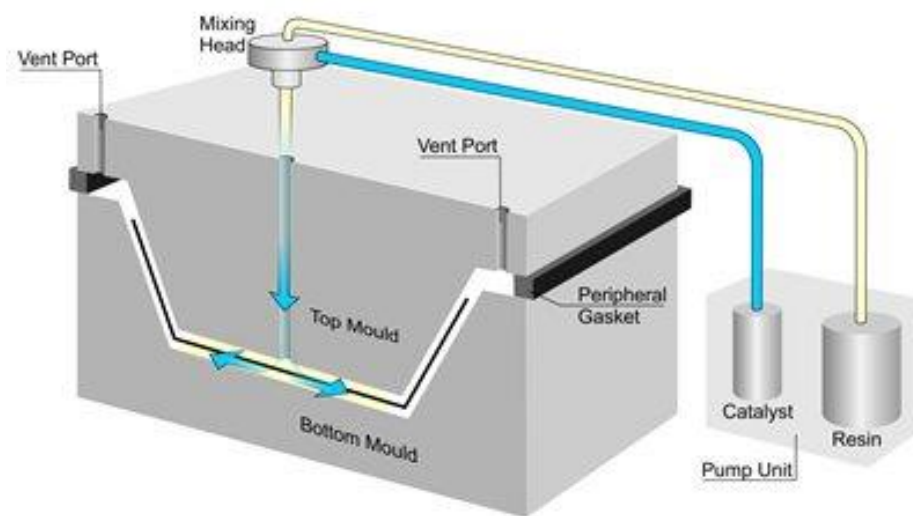


Figura 2.8 - Esquema do processo RTM (Nuplex 2017)

Os principais fatores que influenciam o processo de RTM incluem os reforços utilizados, a resina, a geometria do molde, a temperatura de pré-aquecimento, pressão de injeção, a ventilação do molde e também pode ser considerado as condições atmosféricas. Dentro dos reforços utilizados podem ser considerados de importante relevância o tipo de fibra, a orientação, o tratamento das fibras, a sequência de empilhamento e o volume de fibras (Young and Chuang 1995).

Durante o processo as fibras (ou uma pré-forma) são posicionadas no molde, depois esse molde é fechado e a resina é injetada a elevadas pressões em diversos pontos de injeção, forçando o ar a sair pelos respiros da moldação. Nesta etapa, em que o molde se encontra fechado e as fibras impregnadas, começa o processo de cura do componente. Por fim, o molde é aberto, a peça removida e pode ainda passar por uma etapa de pós-cura para garantir a

polimerização da matriz e garantir a libertação de tensões provenientes da injeção da resina (Laurenzi and Marchetti 2012).

Com utilização de pré-formas, produzidas separadamente do molde, é possível ter mais do que uma cavidade da moldação e, assim, obter vários componentes no mesmo processo de abertura e fecho do molde (Potter 1997).

Neste processo podem ser utilizadas diversas resinas termoendurecíveis, por exemplo: epoxídica, fenólica, entre outras.

Na tabela 2.1 são apresentadas algumas vantagens e desvantagens do processo de RTM.

Tabela 2.1 - Vantagens e Desvantagens do processo RTM

Vantagens	Desvantagens
Componentes grandes e com geometrias complexas	Custo inicial relativamente elevado
Elevada repetibilidade quando comparado com processos de Infusão	Baixa repetibilidade quando comparado com processos AFP e de Enrolamento Filamentar
Tempos de ciclo curtos	Difícil previsão do fluxo de resina, o que pode originar vazios e pontos secos de resina
Baixa libertação de voláteis para a atmosfera	Difícil de prever a pressão de injeção adequada
Bom acabamento das superfícies em todas as faces	Movimentação das fibras durante a injeção devido à elevada pressão
Permite automatização do processo	Exige sensibilidade no design dos moldes

Elevada cadência de produção e a produção de formas complexas com elevada fiabilidade permitiu a utilização deste tipo de processos na indústria aeronáutica. Existem também outras variantes do processo de RTM que podem ser consideradas relevantes, dependendo das

aplicações a que se destinam. Seguidamente serão apresentados alguns desses processos e as principais características de cada um deles.

Compressão RTM (*Compression RTM*)

Este processo consiste na injeção da resina para o um molde parcialmente fechado, com o reforço ou pré-forma no interior da moldação. A resina é injetada por cima das fibras, em vez de as impregnar imediatamente e, seguidamente, o molde é fechado e a resina é comprimida através do reforço. Para o fecho do molde é necessária uma prensa com controlo da fase de compressão, que é realizada a cerca de 0.1 MPa (1 bar). Neste processo a impregnação das fibras decorre na direção da espessura do componente a obter (Advani and Hsiao 2012). Na Figura 2.8, é possível verificar os passos seguidos por este processo.

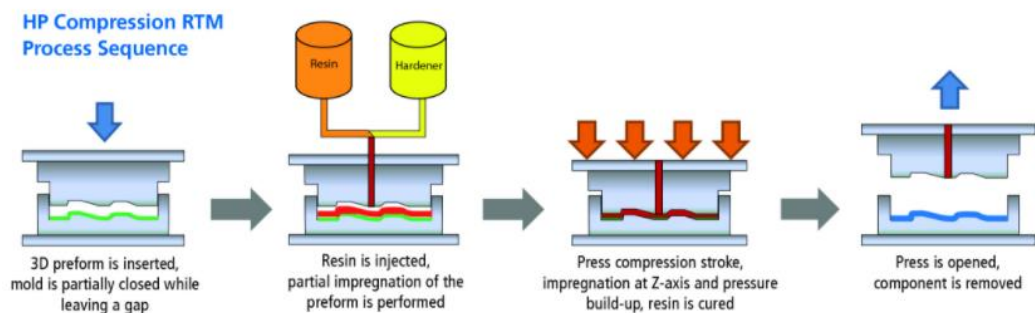


Figura 2.9 - Sequência de fabrico do processo *Compression RTM* (JEC 2016)

A quantidade de resina tem de ser bem estimada para que não haja excesso de resina e para que seja possível atingir o FVF desejado. Este processo é utilizado para reduzir o tempo de enchimento e também evitar zonas com falha de impregnação de resina na superfície do componente. Este processo pode produzir componentes com teor de volume de fibra de 60% (JEC 2016).

Same Quality RTM

A tendência atual do processamento OoA, em vez do tradicional Autoclave, é impulsionada pela necessidade dos fabricantes de produzir peças de maior escala para ajudar a diminuir os custos de produção. O processo SQRTM foi desenvolvido pela *Radius Engineering Inc.* para produzir componentes de qualidade de autoclave sem a utilização do autoclave. A diferença reside na utilização de *pré-impregnados* em vez de pré-formas de tecido.

É feito o empilhamento dos pré-impregnados na superfície do molde, seguidamente o molde é fechado e a resina é injetada a uma pressão elevada (0.5 a 0.7 MPa). Neste caso em particular, a resina não se destina a impregnar o *prepreg*, apenas serve para manter uma pressão hidrostática constante dentro do molde. Essa pressão exercida pelo molde evita a formação de vazios no componente (Black 2010). Na Figura 2.9 é possível verificar um componente obtido por este processo.



Figura 2.10 - Estrutura de teto de helicóptero obtida pelo processo SQRTM (Black 2010)

Light RTM

Este processo permite obter estruturas compósitas com custos mais baixos, moldes mais leves, o que leva a menores tempos de ciclo devido ao aquecimento e arrefecimento do molde mais rápidos. Esta solução surgiu devido à necessidade de reduzir os custos das ferramentas necessárias ao processo de RTM.

2.3.4 VARTM

É um processo de fabrico de materiais compósitos, uma variante do processo RTM que permite a utilização de apenas um molde e de um saco de vácuo, enquanto que no RTM são utilizados dois moldes, o que reduz significativamente os custos do processo. É utilizado, principalmente, na conceção de pás de turbinas eólicas e na indústria naval. Mais recentemente, com o estudo do processo e o desenvolvimento de resinas de epóxico para processos de infusão foi possível aplicar este processo na indústria aeronáutica.

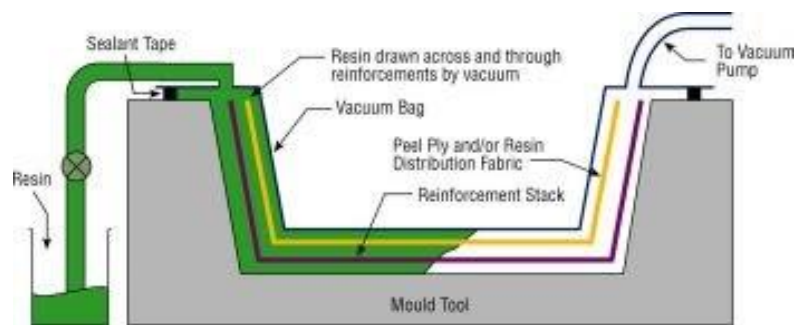


Figura 2.11 - Esquema do processo VARTM (NetComposites 2017)

O processo de VARTM começa com a preparação e mistura da resina com um agente catalisador ou endurecedor, sendo, geralmente, desgasificada para eliminar o ar preso na mistura de resina e assim eliminar possíveis vazios que irão comprometer as propriedades mecânicas do componente a obter.

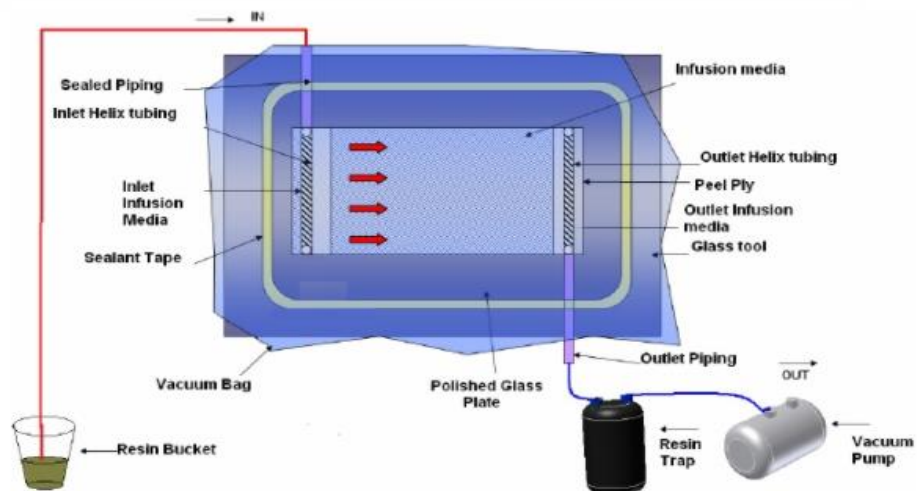


Figura 2.12 - Vista de topo da montagem do processo VARTM (Dhyani 2009)

Durante a infusão é aplicado vácuo na saída do saco de vácuo. No saco, está composto o empilhamento das fibras (ou então uma pré-forma pode também ser utilizada). Este diferencial de pressão permite o escoamento da resina através das fibras. No pós-processamento é necessário deixar a peça curar durante algumas horas, e, possivelmente, terá de cumprir um pequeno estágio numa estufa, conforme recomendado pelo fabricante da resina utilizada.

Na tabela 2.2 são apresentadas algumas vantagens e desvantagens do processo de RTM.

Tabela 2.2 - Vantagens e Desvantagens do processo VARTM

Vantagens	Desvantagens
Baixo custo de processamento	Existe um gradiente de espessura e pouco controlo dimensional
Não requer equipamento muito sofisticado	Baixa qualidade de acabamento
Não requer muito espaço	Elevado conteúdo de vazios
Formas complexas podem ser obtidas	Não há controlo do processo de cura
Elevado FVF (aprox. 60%)	Tempo de ciclo lento
Infusões a baixa pressão	Requer baixa viscosidade da resina

Existem também outros processos que se apresentam como variantes deste processo que visam melhorar as propriedades do laminado, procurando assim abranger outras indústrias que necessitam de características mais específicas. Seguidamente serão apresentados alguns processos que derivam do processo de VARTM.

VAP

É um processo de Infusão de resina que deriva do VARTM e foi patenteado pela EADS Deutschland, que atualmente pertence ao *Airbus Group*. É caracterizado pela utilização de uma membrana permeável que permite uma distribuição mais uniforme de vácuo.

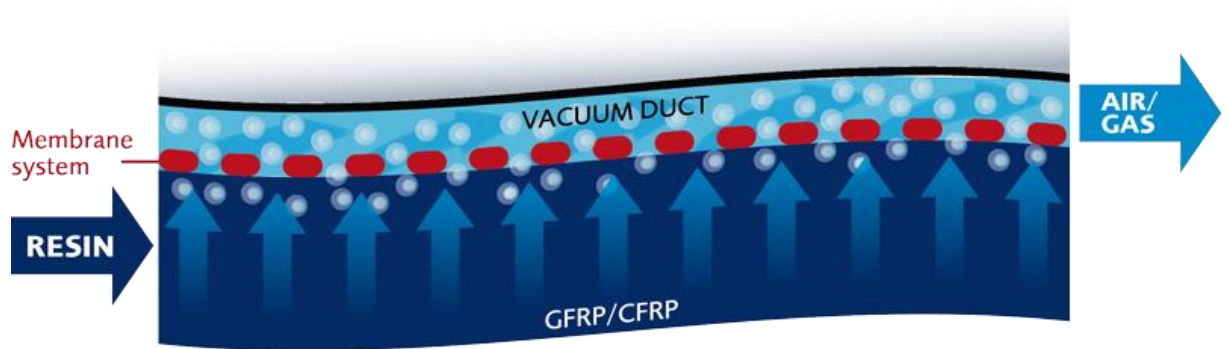


Figura 2.13 - Membrana utilizada no processo VAP (JEC 2014)

Esta membrana é impermeável à resina, mas permeável aos gases existentes no interior do saco de vácuo. É um processo mais robusto que o VARTM porque minimiza o potencial aparecimento de pontos secos de resina e também reduz a percentagem de volume de vazios.

A resina utilizada na infusão encontra-se num reservatório à pressão atmosférica e apenas é aplicado vácuo na outra extremidade do saco de vácuo.

CAPRI

É um processo de Infusão de resina, patenteado pela *The Boeing Company*, caracterizado por ter uma atmosfera controlada (CAPRI), sendo também uma variante do processo de transferência de resina assistida por vácuo (VARTM).

Este processo permite um aumento do FVF devido à compactação (*debulking*) realizado antes da infusão, que através de gradientes de pressão aumenta a compactação das fibras dando origem a uma diminuição da espessura do laminado. A compactação efetuada antes da infusão

irá ter grande influência no tempo de infusão e também na permeabilidade que irá reduzir conforme o aumento da compactação das fibras.

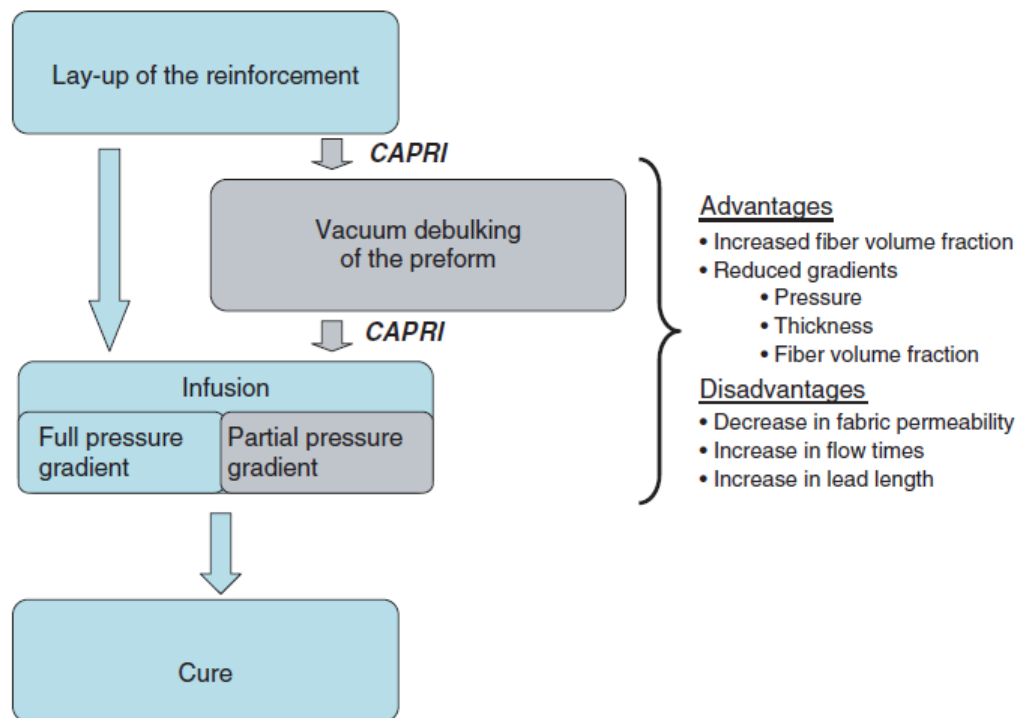


Figura 2.14 - Comparação das etapas dos processos CAPRI e VARTM (Niggemann et al. 2008)

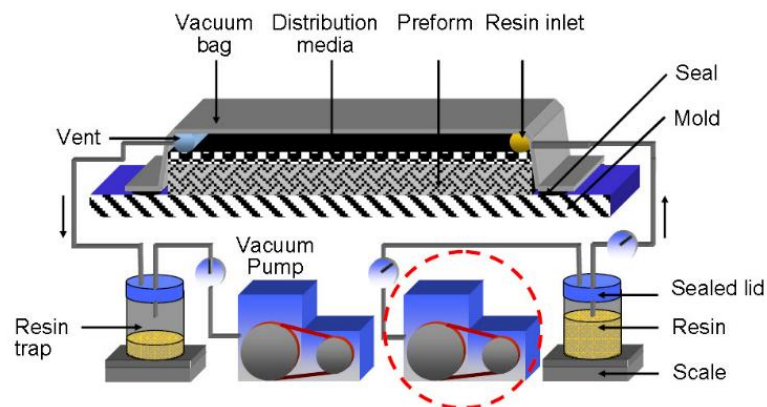


Figura 2.15 - Esquema do processo CAPRI (Niggemann et al. 2008)

Como é realizado dentro de uma atmosfera controlada não requer uma cura em autoclave no pós-processamento, reduzindo assim custos: quer em infraestruturas, quer em energia. Este processo recomenda uma pressão relativa no pote de resina de -15000 Pa e de -65000 Pa na “armadilha”, originando assim um diferencial de pressão de 500 mbar, sendo esta também a pressão utilizada no compactação (*debulking*) (Woods 2008).

Saco Duplo (*Double Bag*)

O *Double Bag* é outro processo patenteado pela *The Boeing Company*, outra variante dos processos de infusão de resina, que, como o nome indica, utiliza dois sacos de vácuo no processo de infusão. Os sacos apresentam duas funções distintas: o primeiro permite a extração dos gases existentes no meio fibroso; enquanto que o segundo saco permite obter uma compactação mais eficaz das fibras, o que leva a uma diminuição do volume de vazios e um aumento da fração de volume de fibra.

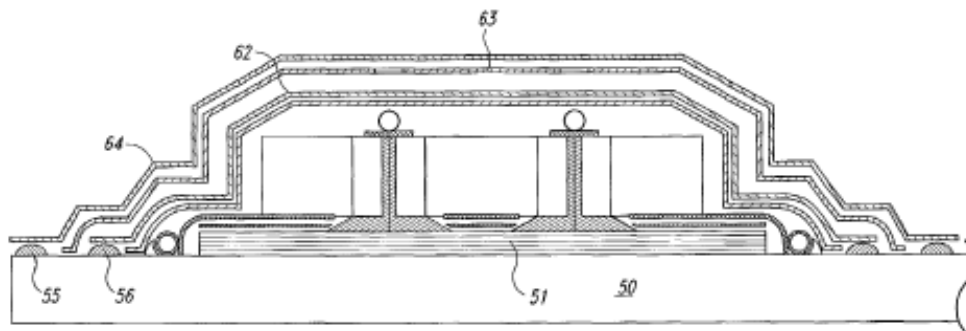


Figura 2.16 - Esquema do processo *Double Bag* (Waldrop 2008)

Com a utilização de um segundo saco de vácuo é possível manter a integridade do vácuo aplicado, evitando assim relaxações que poderão surgir nas zonas da frente de fluxo e também possíveis defeitos originados pela entrada de ar, indesejáveis num processo de infusão de resina.

As empresas que utilizam este processo fazem-no de maneiras diferentes, consoante a geometria da peça e a experiência de quem a realiza. Contudo, há quem recomende a utilização de uma camada de ventilação entre os dois sacos, caso contrário os sacos de vácuo irão extrair o ar conjuntamente e atuarão como um só. Para este efeito poderá ser utilizado um *Breather* ou um NCF (Gardiner 2010).

2.4 Seleção dos Materiais

Para a seleção dos materiais a utilizar era necessário ter em conta que o T-Rigidificador é um componente aeronáutico, portanto será necessária uma pesquisa muito meticulosa, para que a escolha do material seja adequada ao caso em estudo. Optou-se por escolher dois tipos de material, ambos dedicados para aplicações aeronáuticas e com diversos casos de estudo, para testar as suas capacidades e fiabilidade de ambos os sistemas. Foram escolhidos os seguintes sistemas:

2.4.1 Pré-impregnados VBO

Dentro dos *pré-impregnados* a variedade de escolha é imensa. Companhias como a *Cytec*, a *Hexcel* e a *TenCate* apresentam inúmeras credenciais e já conceberam diversos projetos na indústria aeronáutica para empresas como a *NASA*, *Boeing*, *Lockheed Martin*, *Bombardier*, *GE*, entre outras. O *prepreg* escolhido foi o *Hexply M56*, porque serão necessárias pequenas quantidades e neste momento o INEGI tem contactos preferenciais na *Hexcel*.

2.4.2 Resina de Infusão

As resinas utilizadas nos processos de LCM são geralmente resinas termoendurecíveis de baixa viscosidade. E a cada fornecedor de resina corresponde um tecido que se adequa mais à resina escolhida.

Manufacturer	Resin type		Manufacturer	Fibre type
Hexcel	Epoxy HexRTM6	➔	Hexcel	HexForce 12K spread-tow carbon fiber fabric
Cytec	Epoxy Cycom 823RTM		COTECH	COTECH®±45 non-crimp fabric (NCF)
Toray	TR-A36		Toray	Toray intermediate modulus (24K) T800SC carbon fiber

A EMBRAER tem também preferência em trabalhar com fornecedores que estão qualificados pela OEM, principalmente a nível de equipamentos que a empresa já possui para o processo de RTM. No final foi escolhido o sistema de resina RTM6, da *Hexcel*, por já se encontrar creditada para aplicações aeronáuticas.

2.5 Permeabilidade

A permeabilidade é uma característica dos materiais porosos e representa a resistência que esse meio apresenta relativamente ao fluxo de fluidos através de um gradiente de pressão. De forma a obter componentes de boa qualidade é necessário que estes estejam completamente impregnados com resina. Quando existem formas demasiado complexas é provável o aparecimento de pontos secos de resina que irá levar à rejeição de peças, ou seja, custos acrescidos para a entidade que produz os componentes.

É também uma das variáveis de entrada (*Input*) mais importantes na simulação de processos de LCM. É possível através da simulação computadorizada correr modelos, sem recorrer ao método tentativa erro, tornando-se assim mais preciso e também mais eficiente (Šimáček and Advani 2004).

A Lei de Darcy, na Equação 2.1, utilizada no estudo da permeabilidade, foi desenvolvida pelo físico Henry Darcy enquanto determinava a taxa de fluxo da água através da areia.

$$Q = -K_h \cdot A \cdot \frac{dP}{dx} \quad (2.1)$$

Em que:

Q = caudal [m^3/s]

K_h = condutividade hidráulica [$\text{m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})$]

A = área da secção [m^2]

$\frac{dP}{dx}$ = gradiente de Pressão [Pa/m]

A permeabilidade depende, portanto, das propriedades do fluido e do material poroso, e para obter uma aproximação mais científica, foi proposta uma separação em duas variáveis (Scheidegger 1974).

$$K = -K_h \cdot \mu \quad (2.2)$$

Em que:

K = permeabilidade das fibras [m^2]

K_h = condutividade hidráulica [$m^2/(Pa.s)$]

μ = viscosidade do fluido [$Pa.s$]

Atualmente, no contexto dos materiais compósitos é utilizada para classificar o fluxo de resina através de materiais em forma de fibra que servem de reforço. Com o arranjo das Equações (2.1) e (2.2) é possível chegar à expressão:

$$v = \frac{K}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (2.3)$$

Em que:

v = velocidade superficial do fluido [m/s]

K = permeabilidade das fibras [m^2]

μ = viscosidade do fluido [$Pa.s$]

$\frac{dP}{dx}$ = gradiente de pressão [Pa/m]

Existe a permeabilidade saturada em que as fibras de reforço são previamente impregnadas e seguidamente esse fluido é substituído por um novo, que força o fluido que estava anteriormente a sair da moldação. Outro tipo de permeabilidade é a insaturada, em que o fluido que percorre o reforço apenas substitui o ar existente. No entanto, a Lei de *Darcy* foi verificada para o caso de um meio saturado questionando-se a validade desta lei no caso de meios insaturados. Na Figura 2.14 é possível ver o caso da frente de fluxo em que percorre um conjunto de fibras contínuas, onde é visível a interface do fluxo de resina.

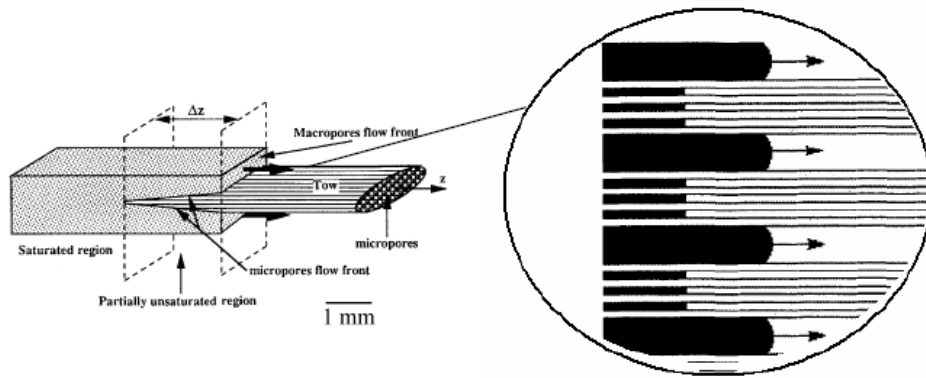


Figura 2.17 - Impregnação das fibras (Cerqueira 2008)

2.5.1 Determinação Experimental da Permeabilidade

Para o cálculo da permeabilidade em meios porosos existem dois métodos: o fluxo unidirecional e o fluxo radial. Com estes métodos é possível medir permeabilidades através de fluxo constante, ou através de pressão constante, a mais comum e mais fácil de controlar.

Um fecho ineficaz do molde, um mau posicionamento das fibras e espaços entre as fibras e o molde podem originar canais rápidos, o que pode influenciar os valores obtidos durante a determinação da permeabilidade. É necessária a utilização de um molde superior transparente para que seja possível visualizar a frente de fluxo e avaliar a existência de canais rápidos.

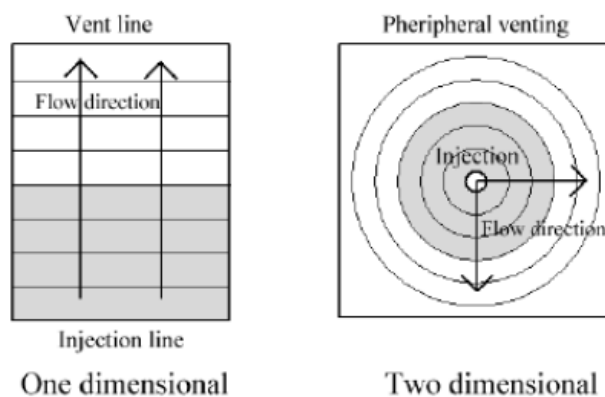


Figura 2.18 - Configurações para a medição da Permeabilidade (Cerqueira 2008)

Na configuração unidirecional a resina é injetada na extremidade do molde, ao longo de uma linha contínua até à saída. O avanço da frente de fluxo pode ser monitorizado com uma câmara de filmar. Este procedimento é bastante simples e também é fácil calcular os valores da permeabilidade do meio poroso.

Na configuração radial a resina é injetada no centro do molde e a frente de resina é acompanhada num plano horizontal de coordenadas. Este tipo de teste apresenta vantagens relativamente ao unidirecional, pois permite registar dados sobre a anisotropia do material em estudo.

Permeabilidade na Curvatura do T-Rigidificador

Para a etapa de simulação, a permeabilidade desempenha um papel muito importante. É necessário que haja conformidade nas variáveis de entrada (*Input*), para que seja possível retirar o máximo proveito da simulação da injeção.

A Equação de *Hagen-Poiseuille* traduz o escoamento de um fluido através de tubo de geometria circular. Esta é uma simplificação da equação de *Navier-Stokes* para esta geometria em particular com o fluido em regime laminar e apenas para fluidos incompressíveis (Hutten 2007). Esta equação pode ser escrita como:

$$Q = \frac{\pi r^4}{8 \mu} \frac{dP}{dx} \quad (2.4)$$

Em que:

Q = velocidade superficial do fluido [m^3/s]

r = raio da secção circular [m]

μ = viscosidade do fluido [Pa.s]

$\frac{dP}{dx}$ = gradiente de pressão [Pa/m]

Associando esta equação à Lei de *Darcy* (Equação 2.1) é possível modificar esta equação de forma a obter um valor para a permeabilidade do meio em estudo.

$$Q = \frac{\pi r^4}{8 \mu} \frac{dP}{dx} = \frac{K A}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (2.5)$$

E, simplificando, obtemos:

$$K = \frac{r^2}{8} \quad (2.6)$$

Em que:

K = permeabilidade [m²]

A partir desta fórmula é possível calcular um valor experimental de permeabilidade das fibras para a zona da curvatura do T-Rigidificador. Nesta zona a permeabilidade das fibras irá ser bastante mais elevada do que nas restantes zonas do componente dada a sua configuração.

3 METODOLOGIA

Seguidamente às infusões realizadas, é necessário fazer uma caracterização do laminado: estudar o respetivo FVF e o VV, recorrendo a estimativas e também a ensaios de queima. Também se procedeu ao controlo da frente de resina, para estimar um valor para a permeabilidade do meio poroso.

3.1 Análise do teor em volume de vazios VV

Neste método, a massa específica medida do compósito (M) é obtida a partir do volume e da massa da placa. Este procedimento é válido para esta norma, pois o laminado obtido tem um volume superior a 2 cm³ (ASTM D2734-09 2012).

A massa específica teórica do compósito é dada por:

$$T = \frac{100}{\left(\frac{R}{\rho_m} + \frac{w_f}{\rho_f}\right)} \quad (3.1)$$

Em que:

T = massa específica teórica do laminado [kg/m³]

R = % massa de resina no compósito

w_f = % massa de fibras no compósito

ρ_m = massa específica da resina [kg/m³]

ρ_f = massa específica do reforço [kg/m³]

O valor de R é obtido a partir da queima de uma amostra do laminado. Ao provocar a ignição da amostra, é possível calcular a perda de massa de resina que irá volatilizar-se durante o teste de queima. A partir desse valor de massa perdida é possível calcular o R, sabendo que o remanescente da percentagem representa o FWF (ou w_f) (ASTM D2584-94 1994).

$$R = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Em que:

R = % massa de resina no compósito

W_1 = massa da amostra a queimar [kg]

W_2 = massa dos resíduos pós queima [kg]

Tendo os valores de R e de w_f é possível calcular o volume de vazios (VV) que é dado pela seguinte expressão:

$$VV = \frac{100 (T - M)}{T} \quad (3.3)$$

Em que:

VV = % volume de vazios

M = massa específica medida do laminado [kg/m³]

T = massa específica teórica do laminado [kg/m³]

São utilizadas 3 ou 5 amostras de forma a obter a média das amostras utilizadas. É sugerido o cálculo do desvio padrão para calcular a dispersão de valores entre as amostras utilizadas.

$$s = \sqrt{\frac{\sum X^2 - n(\bar{X})^2}{(n - 1)}} \quad (3.7)$$

Em que:

s = desvio padrão das amostras [%]

X = valor observado da amostra [kg]

n = numero de amostras

\bar{X} = média aritmética do número de observações [kg]

A descrição da metodologia utilizada para os testes de queima encontra-se esquematizada na figura 3.1.

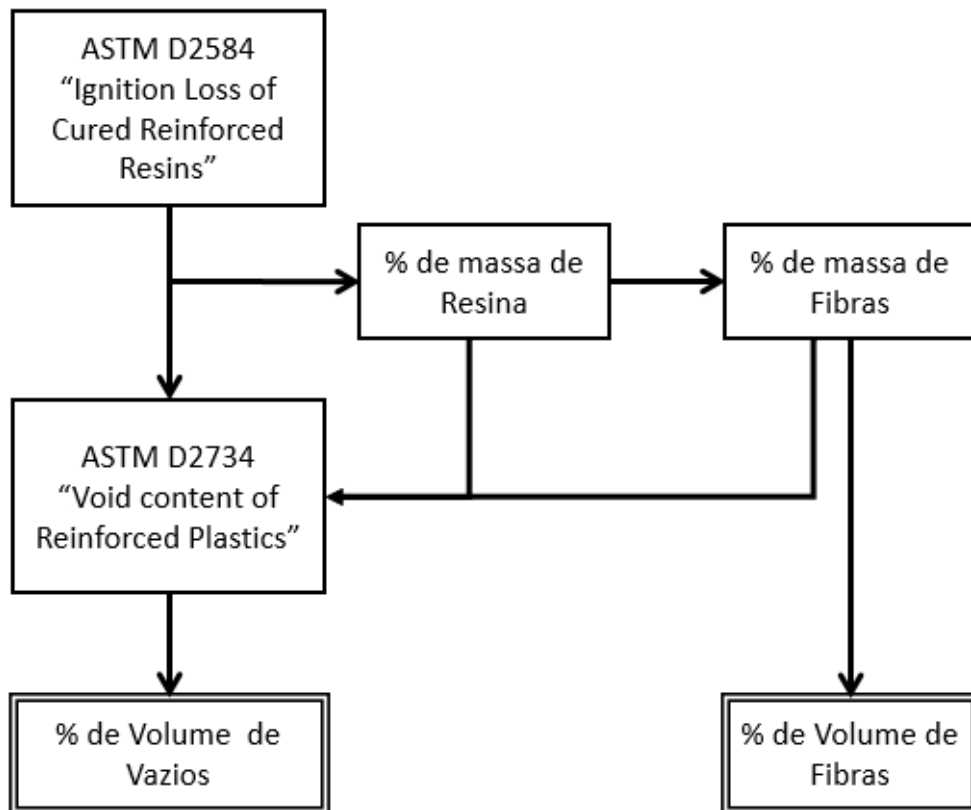


Figura 3.1 - Metodologia utilizada para cálculo do FVF e VV

3.2 Análise do teor em volume de fibras FVF

A fração do volume de fibras é extremamente importante num laminado, pois permite avaliar o rácio de volume de fibra relativamente ao volume do material compósito. O conhecimento da percentagem de volume de fibras de um material compósito é essencial, pois este valor é particularmente afeto a algumas das suas propriedades mecânicas. Com este valor é possível avaliar também a qualidade do compósito: valores demasiado elevados representam uma menor resistência do compósito à fadiga, assim como menor capacidade de resistir as condições atmosféricas (ASTM D2734-09 2012).

Método 1

Um dos métodos para obter uma aproximação do teor de volume de fibras é através do cálculo do volume de fibras aparente (Heider and Hsiao 2012). Neste método a espessura, h , é medida em diversos pontos do laminado obtido com o auxílio de um paquímetro. Será necessário ter em conta a variação da espessura do laminado, proveniente do gradiente de pressão existente na entrada e na saída do saco de vácuo.

$$FVF_{Aparente} = \frac{n A_w}{h \rho_f} \quad (3.5)$$

Em que:

n = número de camadas do laminado

h = espessura do laminado [m]

A_w = peso por unidade de área das fibras [kg/m²]

ρ_f = massa específica das fibras [kg/m³]

Método 2

Outro método para obter o volume de fibra é através de um ensaio de queima (ASTM D2584-94 1994), em que é possível obter não só o volume de fibra; através da percentagem de massa de resina, mas também o volume de vazios do laminado. É considerado o método mais simples para a obtenção do volume de vazios (Nijssen 2015).

Após obter a percentagem de massa de fibras, a partir da queima do provete, é possível obter a fração do volume de fibras, dado que já são conhecidas a massa específica das fibras e da resina utilizadas no processo de obtenção do laminado.

$$FVF = \frac{1}{\left[1 + \frac{\rho_f}{\rho_m} \left(\frac{1}{w_f} - 1\right)\right]} \quad (3.6)$$

Em que:

ρ_m = massa específica da resina [kg/m³]

ρ_f = massa específica do reforço [kg/m³]

w_f = % massa de fibras no compósito

3.3 Análise da Frente de Fluxo

A análise da frente de resina foi realizada com a gravação dos processos de infusão no Laboratório de Compósitos do INEGI. Através da gravação é possível verificar a existência de canais rápidos, ou então, se ocorreu problema com o saco de vácuo que permitiu a entrada de ar durante a infusão. Foi realizada marcação de uma escala graduada para acompanhar a impregnação das fibras durante a infusão.

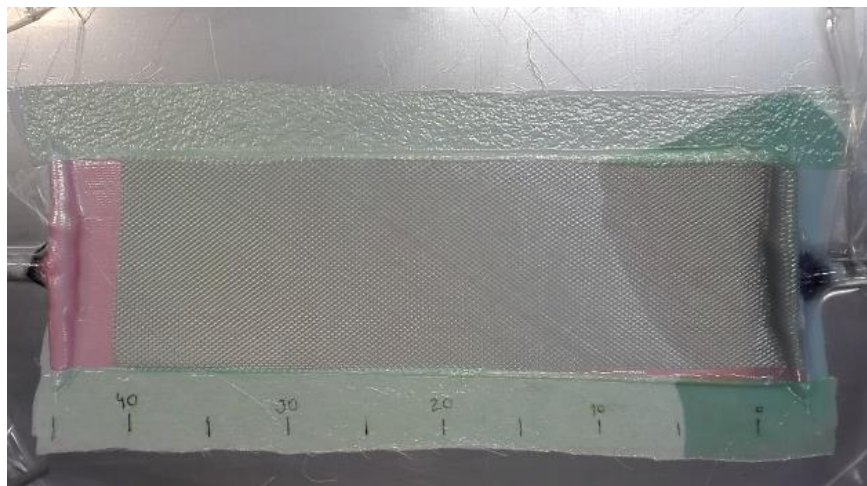


Figura 3.2 - Controlo da frente de resina durante uma infusão

Este método é denominado Aproximação da Frente de Fluxo ao Quadrado e tem como objetivo caracterizar a permeabilidade de um dado tecido de fibras, a partir de procedimentos experimentais. A posição da frente de fluxo deve ser representada num gráfico em função do tempo decorrido e, posteriormente, elevada ao quadrado, o que irá dar origem a uma reta com

um determinado declive, m , a partir do qual é possível obter um valor experimental da permeabilidade do meio fibroso utilizado nos trabalhos experimentais (Alms et al. 2010).

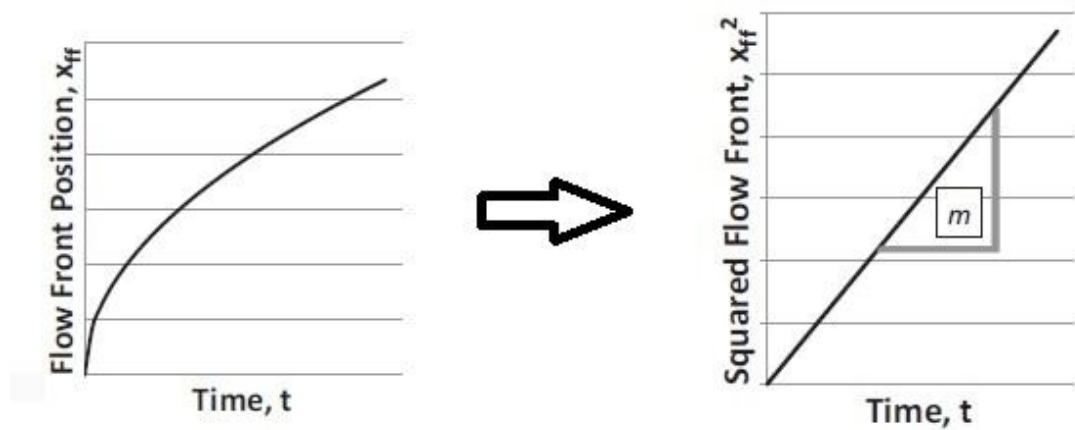


Figura 3.3 - Exemplo de gráfico da frente de fluxo em função do tempo e respetiva frente de fluxo elevada ao quadrado (Alms et al. 2010)

A permeabilidade do meio poroso, para o caso de um escoamento unidirecional a pressão constante, pode ser obtida através da integração em ordem ao tempo da Lei de *Darcy*, dando assim origem à seguinte expressão:

$$K = \frac{x_{ff}^2 \emptyset \mu}{2 P_l t_{ff}} \quad (3.7)$$

Sabendo que:

$$\emptyset = 1 - FVF \quad (3.8)$$

Em que:

K = Permeabilidade [m^2]

x_{ff} = posição da frente de fluxo [m]

\emptyset = porosidade [%]

μ = viscosidade do fluido [Pa.s]

P_I = pressão de injeção [Pa]

t_{ff} = tempo decorrido da infusão [s]

Usando a Equação 3.7 e o declive da reta obtida, m , o valor experimental da permeabilidade é dado pela equação:

$$K = \frac{\emptyset \mu}{2 P_I} m \quad (3.9)$$

Em que:

m = declive da reta obtida

O erro do valor experimental da permeabilidade obtido através deste procedimento pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$e = 100 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ffi} - \sqrt{m t_i})^2} \quad (3.10)$$

Em que:

n = número de pontos utilizados para deteção da frente de fluxo

t = tempo decorrido até ao ponto analisado [s]

i = posição analisada da frente de fluxo

A partir desta análise da frente de resina é possível obter valores experimentais de permeabilidade que depois serão utilizados nas simulações que irão ser efetuadas no *software* LIMS, para obter valores mais confiáveis. Serão primeiramente validadas as simulações de uma placa com as mesmas dimensões desta e posteriormente esses valores serão utilizados para a simulação do T-Rigidificador.

4 TRABALHO EXPERIMENTAL

Foram realizadas quatro infusões através de processos VARTM: duas Infusões Simples e duas pelo processo CAPRI. Deveriam ter sido realizadas mais infusões para obter uma maior amostra de resultados; tal não foi conseguido devido à falta de material e de tempo para realizar este projeto.

Nesta etapa não será utilizada a resina selecionada no Subcapítulo 2.4, pois nesta etapa será feita uma pré-validação experimental, para introdução e correlação de dados através da simulação do processo. Para implementação deste trabalho experimental foi utilizada resina Biresin® CR83 com o endurecedor CH83-6 e o tecido utilizado foi de fibra de vidro Twill 2x2 de 280 g/m². De notar que, para haver termo de comparação com o T-Rigidificador apresentado no Capítulo 1, as placas foram obtidas com 16 camadas de tecido de dimensões aproximadas de 450x150 mm² com a orientação 0/90°.

Primeiramente, é feita uma introdução teórica dos processos utilizados. É, também, apresentado o equipamento necessário e o procedimento passo a passo para correta realização das duas variantes de infusão realizadas.

4.1 O Processo de Infusão

Como foi descrito no Capítulo 2, o processo de infusão de resina é caracterizado pela existência de um molde sobre o qual são empilhadas as fibras, na orientação desejada e, seguidamente, impregnadas sob o efeito de vácuo. Seguidamente serão dadas a conhecer algumas noções do processo de infusão, necessárias para realizar um bom trabalho experimental.

4.1.1 Compactação do Reforço

O processo de RTM pode ser descrito como um caso especial do processo de infusão de resina em que estes diferem apenas nas condições de fronteira. Em ambos os processos a resina é conduzida através de um diferencial de pressão, definida pela diferença entre os níveis de pressão entre a entrada e a saída.

Numa infusão, como a resina se encontra à pressão atmosférica, a zona de entrada de resina está também próxima da pressão atmosférica, daí é possível concluir que essa zona é a que irá apresentar uma maior espessura. No entanto, na frente de resina a pressão é igual à pressão de vácuo, resultando assim num equilíbrio de pressões. A pressão de compactação é considerada a diferença entre a pressão atmosférica e a pressão de vácuo.

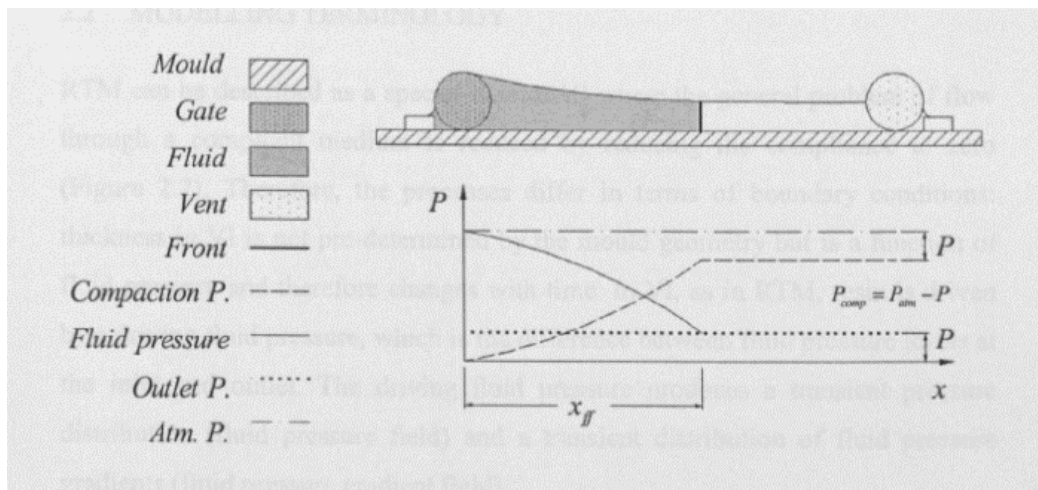


Figura 4.1 - Equilíbrio de pressões num processo de Infusão (Correia 2004)

A espessura no processo de Infusão não é pré-determinada pela geometria do molde, como no processo de RTM, mas varia em função da pressão à qual o reforço está sujeito e, portanto, varia com o tempo e a distância. É possível verificar na Figura 4.2 a variação de espessura que difere os processos de RTM e de Infusão de resina.

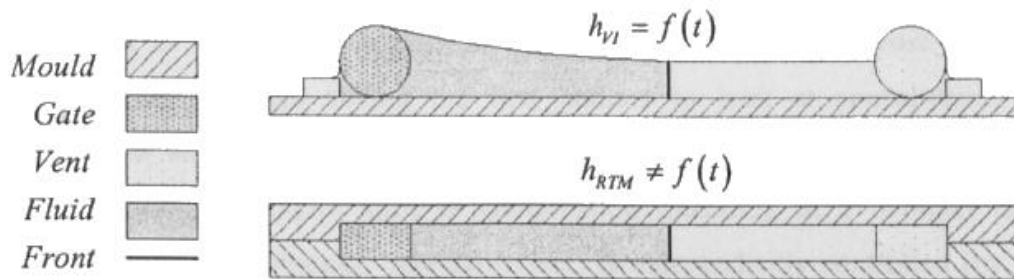


Figura 4.2 - Diferenças na espessura entre os processos RTM e Infusão (Correia 2004)

4.1.2 Incertezas do Processo

Todos os processos de fabrico de materiais compósitos apresentam uma grande incerteza associada. As principais fontes desta incerteza são a variabilidade dos materiais que podem ser provocados pela mutabilidade da arquitetura das fibras, incorreto manuseamento ou armazenamento das fibras e/ou resinas, e também nas incertezas na formulação e composição da resina. As condições atmosféricas e de processamento também podem causar incerteza na produção deste tipo de materiais (Mesogitis et al. 2014).

A heterogeneidade das fibras pode afetar significativamente o seu empilhamento, bem como provocar uma variação da permeabilidade que irá afetar diretamente a infusão e cura do futuro laminado. Tanto tecidos como *pré-impregnados* estão sujeitos a fatores que influenciam a qualidade do compósito. O transporte, manuseamento e até o armazenamento deste tipo de materiais em rolos podem provocar desalinhamento das fibras tornando praticamente impossível garantir a homogeneidade das mesmas; apesar da sua produção ser feita com elevado rigor. Além disso, a arquitetura das fibras é o que confere o elevado desempenho estrutural dos componentes, tendo assim um papel crítico em fenómenos como falhas ou danos.

A cura também é outra das fontes de incerteza do processamento de materiais compósitos. É uma das etapas cruciais na produção de materiais compósitos e a sua variabilidade depende muito dos materiais utilizados e também do material utilizado no molde. Essas incertezas podem originar a formação de tensões residuais, resultar em curas inacabadas ou excessivas, bolhas e até provocar degradação do material no caso de exceder a temperatura de cura indicada.

Podemos concluir que a produção de compósitos termoendurecíveis é um procedimento muito complexo, envolvendo processos de diferentes físicas e escalas. Cada uma das etapas de preparação, impregnação e cura introduz variabilidade nos processos de produção subsequentes, criando interdependências fortes entre os parâmetros do processo e sua variabilidade e propriedades do produto (Mesogitis et al. 2014).

4.1.3 Processo de Compactação (*debulking*)

O processo de Compactação pode ou não ser efetuado numa etapa de pré-processamento de uma Infusão. Esta etapa é fundamental para garantir uma compactação adequada das fibras e atingir FVF elevados, essenciais para componentes aeronáuticos.

Foi realizado um estudo em que foram aplicados 400 ciclos de compactação. Em cada ciclo, a pressão de compactação aumentava até aos 80 kPa durante 30 segundos e diminuía até aos 15 kPa também em 30 segundos. Neste estudo foram utilizadas 15 camadas de tecido de fibra de vidro com um peso de 0,810 kg/m². Na Figura 4.2, é possível verificar que nos primeiros 100 ciclos de compactação existe uma redução de espessura de cerca de 0.3 mm, enquanto que nos restantes 100 ciclos há apenas uma redução adicional de 0.1 mm (Niggemann et al. 2008).

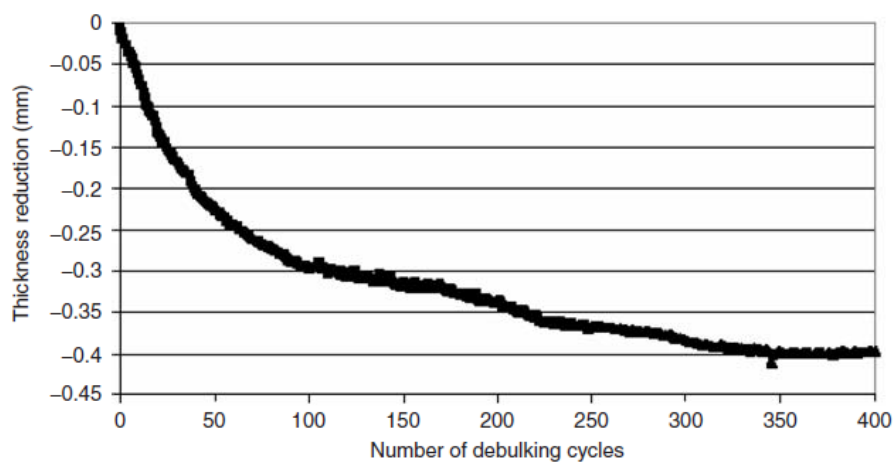


Figura 4.3 - Influência do processo de compactação (*debulking*) na espessura do empilhamento das fibras (Niggemann et al. 2008)

Este procedimento influencia não só o tempo do processo de infusão, com a diminuição da permeabilidade das fibras, mas também a espessura final do componente a obter a partir deste processo.

No trabalho experimental foram realizados 50 ciclos de *Compactação*, pois é nesta etapa que se verifica maior redução de espessura, e para futura validação deste processo para obtenção de componentes aeronáuticos. Com este número de ciclos é esperada, no mínimo, uma redução da espessura em 2 décimas de milímetro; o que corresponderá num aumento do FVF em cerca de 5%.

4.1.4 Canais Rápidos (*Race-Tracking*)

Os desvios da frente de fluxo de resina, conhecidos como canais rápidos (*Race-Tracking*), podem ocorrer devido a diversos fatores: pela utilização de pré-formas, a maior compactação das camadas de fibra em determinadas zonas, desalinhamento das fibras, entre outros. A este fenómeno está associada uma variação da permeabilidade local do tecido ou fibras (Di Fratta et al. 2013). Estes problemas têm sido bastante estudados, e este estudo é de extrema importância para o desenvolvimento do processo de infusão. O fluxo deve, portanto, ser controlado para conseguir uma produção consistente e evitar problemas de preenchimento.

No caso do T-Rigidificador a zona crítica para a ocorrência do fenómeno de canais rápidos é a zona da curvatura do perfil “T”. As camadas de fibra são orientadas de forma a criar a zona em “T”, contudo, há uma zona que fica por preencher, e que é propícia à formação de canais rápidos. Esta zona é normalmente preenchida com um *filler*, mas a etapa de injeção tem de ser muito bem estudada para evitar este fenómeno.

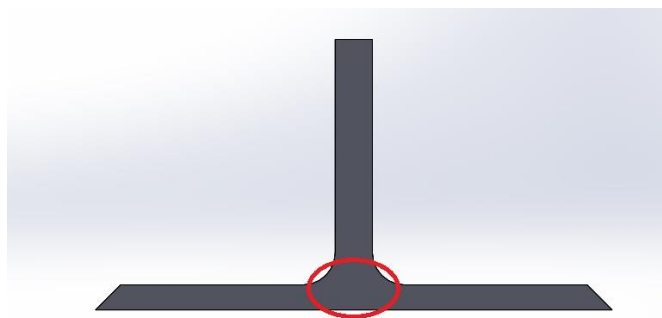




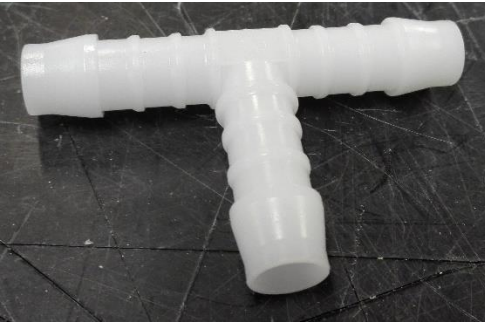

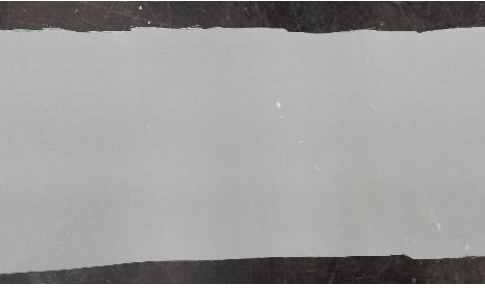
Figura 4.4 - Zona de formação de canais rápidos no T-Rigidificador.


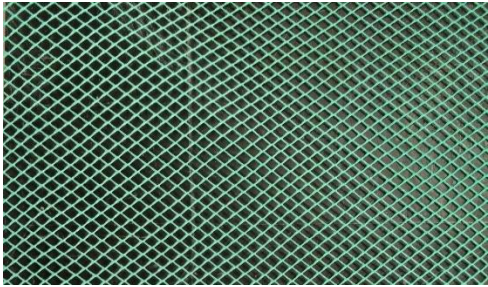

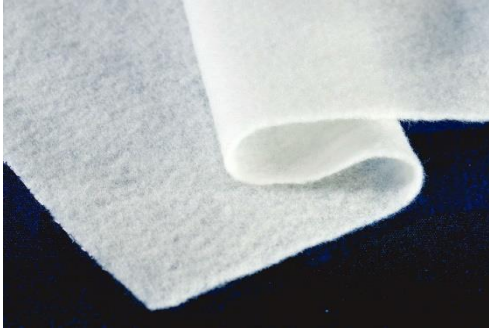

4.2 Equipamento Necessário

O equipamento necessário para realizar as infusões encontra-se disponível no Laboratório de Materiais Compósitos do INEGI.

Tabela 4.4.1 – Equipamento necessário para o processo de Infusão a Vácuo

Material	Material	Função do Material
Bomba de Vácuo		Permite controlar o diferencial de pressão no interior do saco de vácuo onde se realiza a infusão.
Molde		Superfície na qual é feito o empilhamento das fibras
Pote de Resina / “Armadilha”		Permite que a resina esteja sobre vácuo aplicado através da bomba / Impede que a resina saia da infusão diretamente para a bomba.

Tubo		Distribuição de resina e extração do ar
Fita		Vedação na zona de vácuo
“T” de ramificação		Ramificação de linha de alimentação de resina ou de linha de vácuo
Tubo em Espiral		Distribuição de resina na entrada e uniformização na saída
<i>Peel Ply</i>		Facilita a desmoldação da peça obtida

Filme Perfurado		Facilita a distribuição da camada de resina da rede de distribuição para as fibras
Rede de Distribuição		Melhora o escoamento de resina nas fibras
Saco de Vácuo		Isola a interface zona de infusão e meio envolvente
<i>Breather</i>		Limita o fluxo de resina na parte lateral do empilhamento de resina
Grampo		Fechar a passagem de resina quando necessário

4.3 Preparação de uma Infusão Simples

Procedimento de um processo de infusão de resina:

1. Garantir que o molde utilizado tem uma superfície uniforme, limpar os vestígios de resina e, seguidamente, passar pano húmido com acetona ou álcool.
2. Com fita adesiva, cobrir as extremidades da placa para evitar a aplicação do desmoldante na zona da fita de vedação.
3. Aplicar 2 ou 3 camadas de desmoldante com um pano, em intervalos de 15 min
4. Aplicar a Fita em volta do saco de vácuo (a cerca de 20mm da extremidade).
5. Pesar e medir as camadas de fibra a utilizar
6. Colocar Fibras na orientação desejada
 - a. na entrada: sobre o tubo em espiral
 - b. na saída: sobre o tubo em espiral
7. Colocar *Peel Ply*
8. Colocar Filme Perfurado
 - a. Deve ser um pouco mais curto que as fibras no comprimento e na largura
9. Colocar Rede de Distribuição
 - a. na entrada: sobre o tubo em espiral
 - b. na saída: mais curto 20mm que as fibras
 - c. nas laterais: ligeiramente mais estreita que as fibras
10. *Peel Ply* novamente
 - a. na entrada: sobre a rede de distribuição
 - b. na saída: sobre o tubo em espiral
11. Colocar tiras de *Breather* nas laterais dos tecidos empilhados.
12. Colar o saco de vácuo no molde, primeiro nos cantos, depois nos centros do molde e, por fim, verificar se a colagem foi bem efetuada.



Figura 4.5 - Procedimento correto para colocar o saco de vácuo

13. Fazer a ligação da bomba de vácuo, do pote de resina e da “armadilha”, usando um grampo para fechar a entrada de resina (nos esquemas seguintes, a traço interrompido encontram-se os tubos fechados pelos grampos)

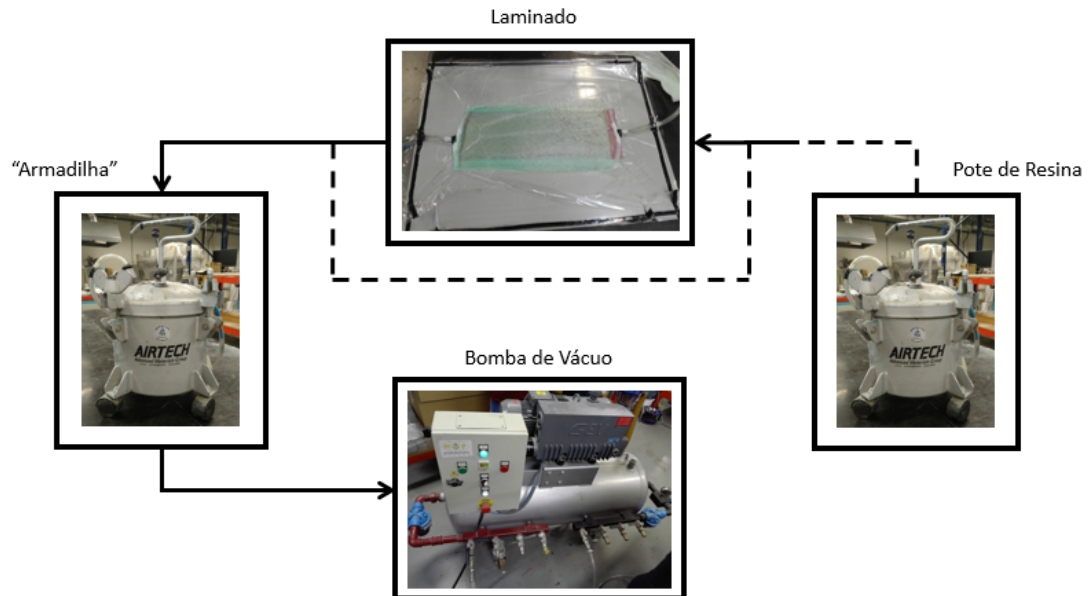


Figura 4.6 - Ligação do equipamento antes de uma Infusão Simples

14. Aplicar vácuo no reforço das fibras e verificar se se encontra bem compactado e sem entradas de ar no saco de vácuo (repetir procedimento várias vezes para garantir que não existem fugas)

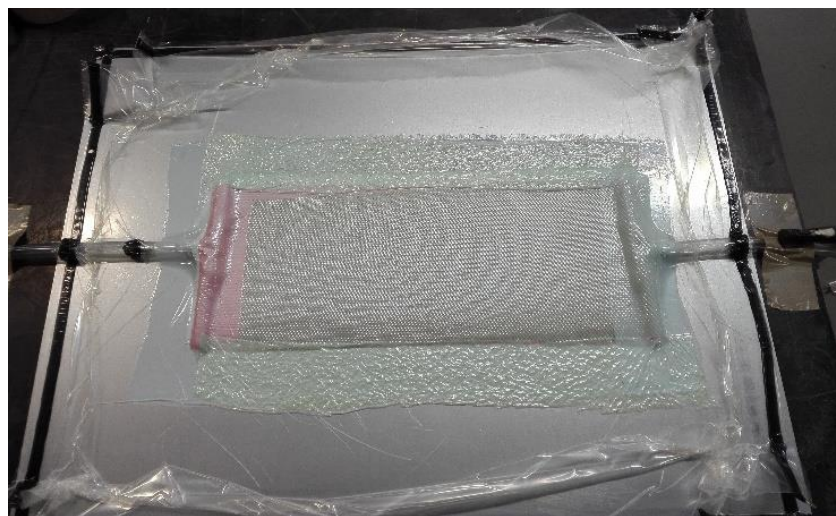


Figura 4.7 - Saco de vácuo corretamente realizado

15. Desgaseificar a resina

Nota:

Optou-se por fazer a **desgaseificação da resina**, para libertar os gases existente. Esta como apresenta uma massa específica mais elevada que o ar, não permite que seja libertado para fora do volume de resina.

16. Encher o pote de resina e abrir a ligação da entrada de resina

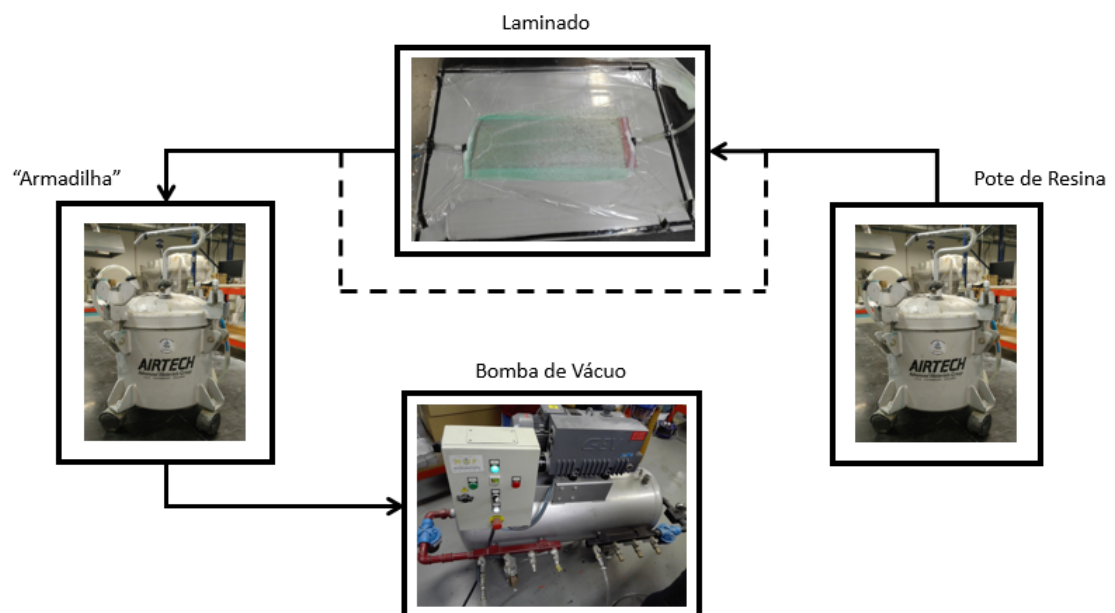


Figura 4.8 - Ligação do equipamento durante uma Infusão Simples

17. Quando a resina atingir a outra extremidade das fibras, deixar a resina fluir mais um pouco para serem removidas eventuais gases existentes no seu interior.
18. Fechar entrada de resina e fazer um *by-pass* para permitir a cura do laminado sob vácuo.

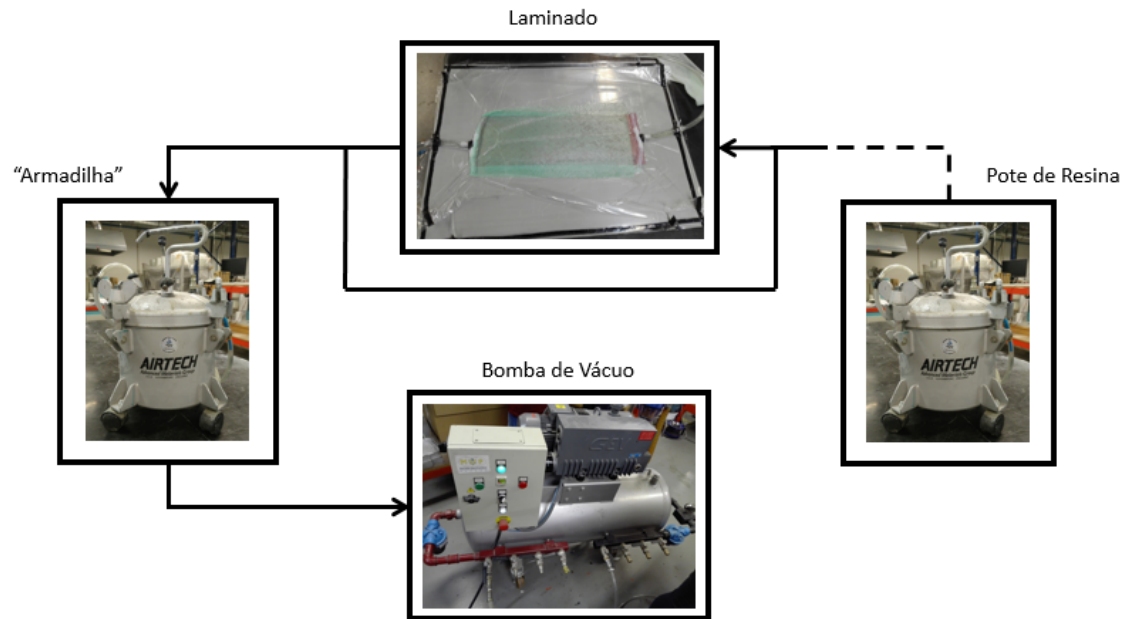


Figura 4.9 - Ligação do equipamento para a cura uma Infusão Simples

19. Deixar o laminado repousar cerca de 12 horas
20. Remover ligações e colocar o molde com o laminado na estufa o tempo indicado na ficha técnica da resina

4.4 Preparação de uma Infusão CAPRI

A preparação do processo CAPRI é semelhante à de uma infusão simples. A única diferença reside no facto de ser necessário realizar os ciclos de compactação, antes de iniciar a infusão propriamente dita. Portanto, a ligação inicialmente é um pouco diferente, e como o pote de resina necessita de estar sob vácuo também requer estar ligado à bomba de vácuo.

Procedimento do processo de Compactação:

1. A etapa de preparação do molde e empilhamento das fibras é semelhante a uma infusão simples.
2. Fazer a seguinte ligação da bomba e da “armadilha” (as zonas a traço interrompido encontram-se fechadas com um grampo)

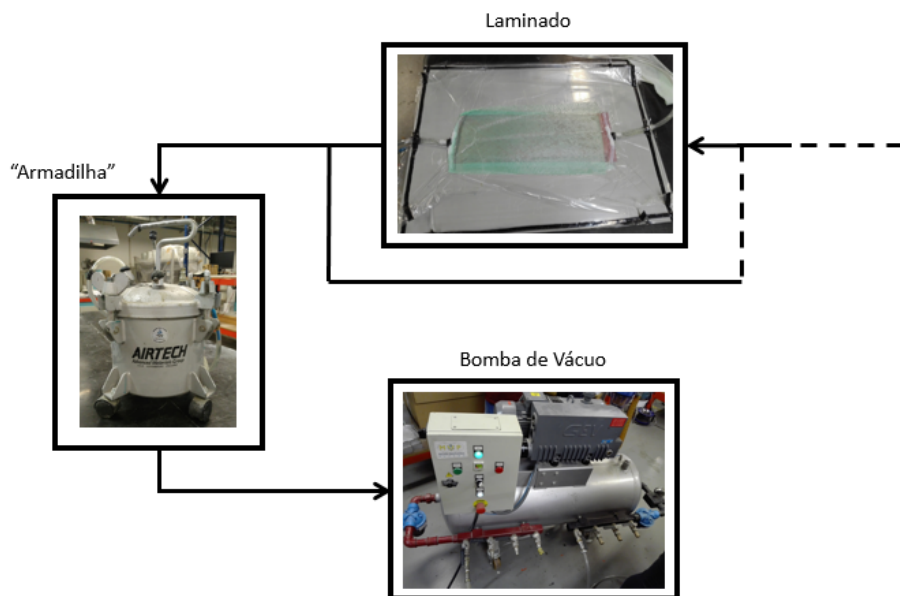


Figura 4.10 - Ligação para o processo de compactação (*debulking*)

3. Parâmetros da bomba:

Low 1	High 1
-84000 Pa	-87000 Pa

4. Ligar a bomba (irá atingir os -870 mbar) e seguidamente deixar repousar 30 segundos
5. Desligar a bomba
6. Abrir uma das válvulas da bomba e garantir que o saco de vácuo fica solto, para isso deve-se abrir ligeiramente o grampo
7. Fechar a válvula quando a pressão atingir os -150 mbar
8. Deixar repousar mais 30 segundos
9. Ligar a bomba (deve disparar e atingir os -870 mbar) e repetir o procedimento as vezes necessárias.

Processo de infusão CAPRI:

10. Ligar o pote de resina à bomba de vácuo e ao empilhamento das fibras.

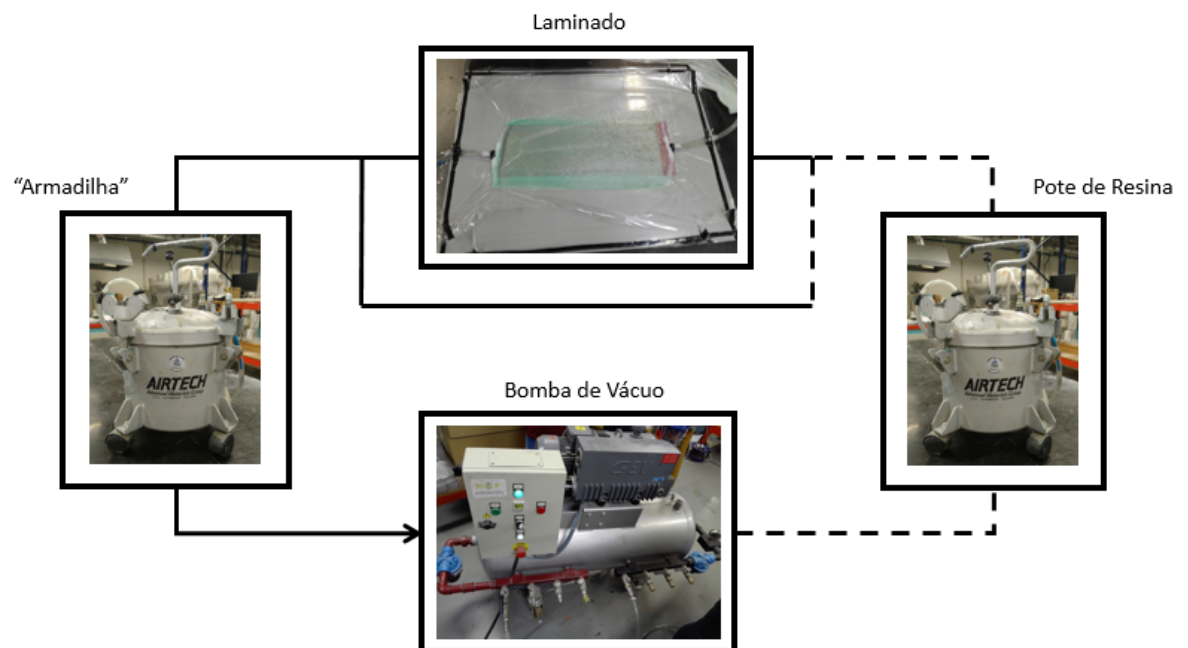


Figura 4.11 - Ligação do equipamento antes de uma Infusão CAPRI

11. Desgaseificar a resina
12. Encher o pote de resina, remover o grampo entre a bomba e o pote e seguidamente entre o pote e o empilhamento das fibras para iniciar a infusão.

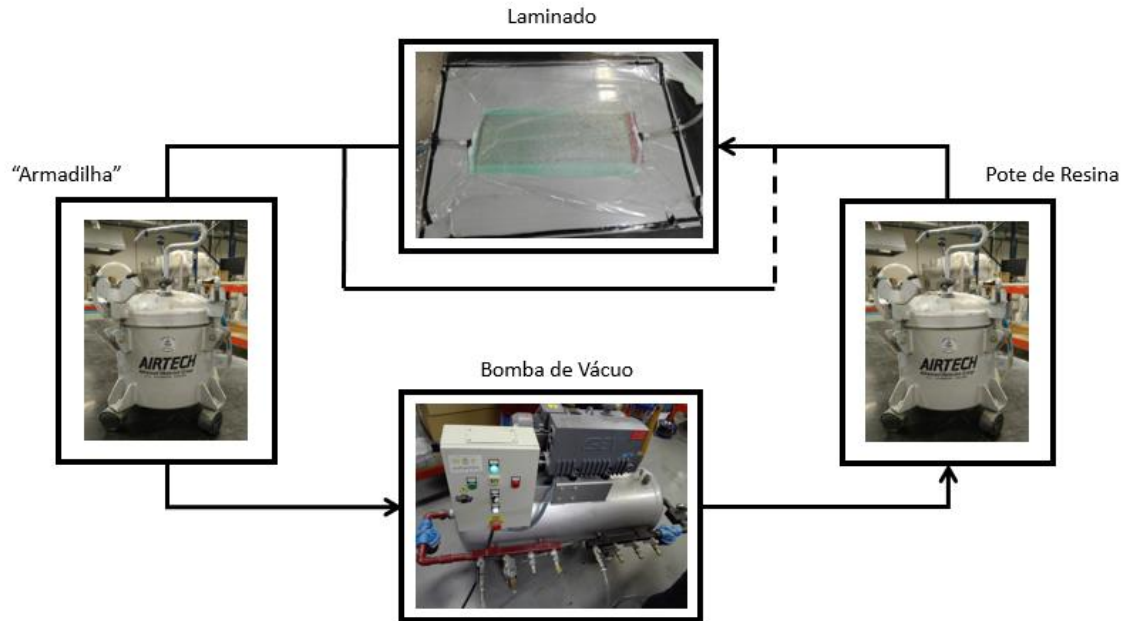


Figura 4.12 – Ligação do equipamento durante uma infusão CAPRI

13. Quando a resina atingir a outra extremidade das fibras, deixar a resina fluir mais um pouco para serem removidas eventuais gases existentes no seu interior.
14. Fechar entrada de resina e fazer um *by-pass* para permitir a cura do laminado sob vácuo.

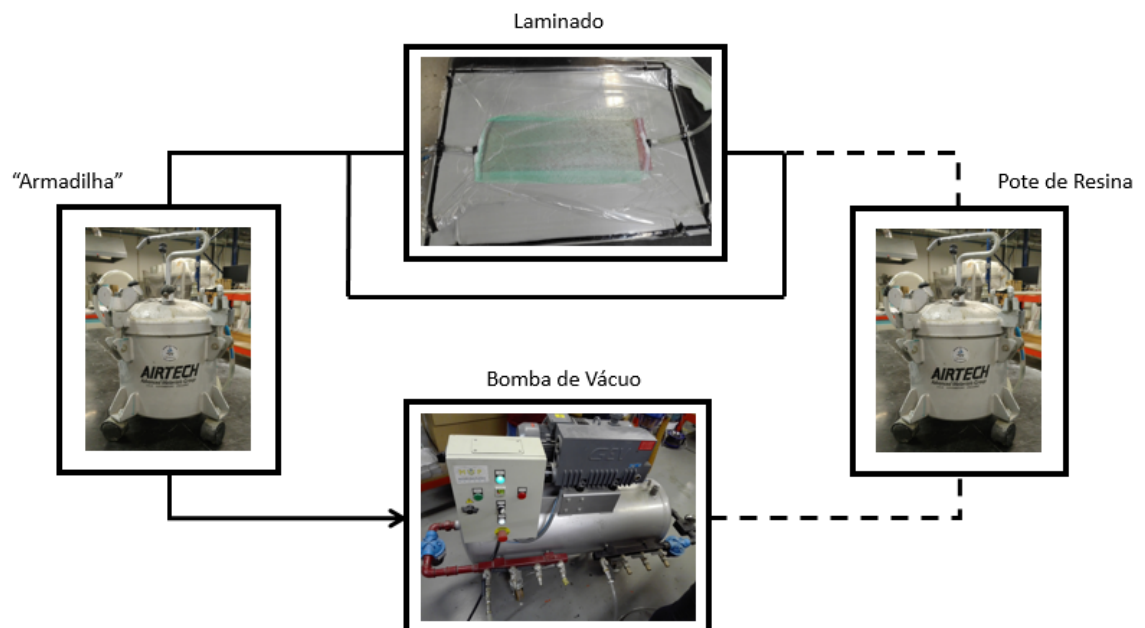


Figura 4.13 - Ligação do equipamento para a cura uma Infusão CAPRI

15. Deixar o laminado repousar cerca de 12 horas
16. Remover ligações e colocar o molde com o laminado na estufa o tempo indicado na ficha técnica da resina.

5 OPTIMIZAÇÃO DO PROCESSO VARTM PARA O DEMONSTRADOR T-RIGIDIFICADOR

5.1 *Software* de Simulação

Para a otimização do processo VARTM, foi utilizado um programa de simulação: o LIMS. Este é um *software* que permite a simulação do processo de Transferência de Resina (RTM), e outros processos semelhantes, pelo método de Elementos Finitos e pelo método de Controlo de Volume. A versão utilizada do programa é a 5.0.7 e encontra-se limitada a 2500 nós, visto que é uma versão *open source* (UDEL 2017).

Esta ferramenta permite, de uma forma rápida e economicamente viável, verificar e otimizar o processo, evitando assim o consumo de recursos e tempo desnecessários. Como variáveis de entrada (*Input*) temos a geometria da peça, que foi obtida com recurso ao programa *ABAQUS®*; a pressão de injeção, que terá de ser assumida como um diferencial de pressão; a viscosidade da resina; a permeabilidade das fibras e também uma estimativa do possível FVF que irá ser obtido no compósito após o processo experimental.

Após a simulação, e como variáveis de saída (*Output*), é possível ao utilizador controlar o fluxo de resina, a distribuição da pressão na peça e obter também uma previsão do tempo de enchimento.

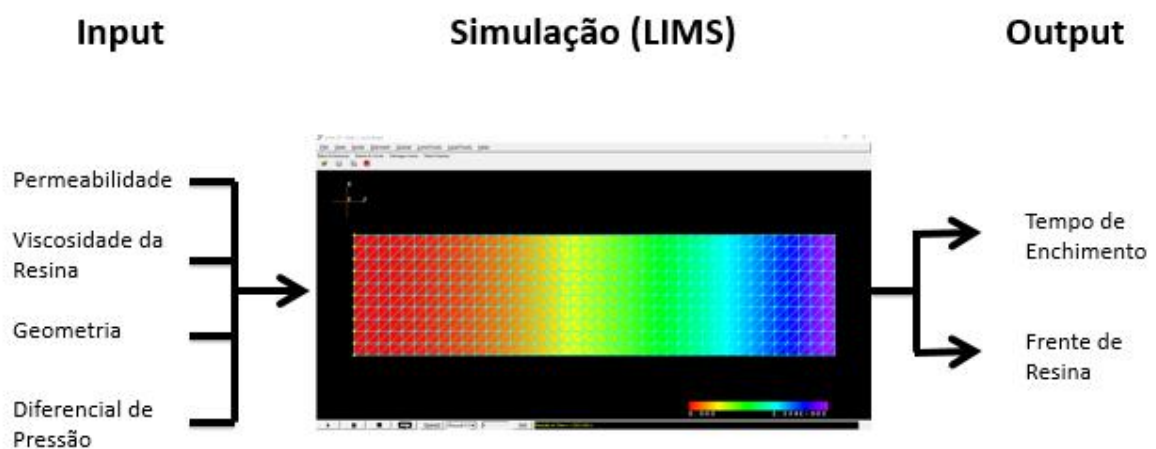


Figura 5.1 – Variáveis de entrada (*Input*) e de saída (*Output*) para simulação no LIMS

5.2 Placa *Standard*

Inicialmente foi realizada a simulação de uma placa com as dimensões *standard* de $0.1 \times 0.4 \text{ m}^2$, para familiarização com o programa. A malha da placa foi obtida com recurso ao programa *ABAQUS®*, com elementos triangulares estruturados de 10mm, que perfazem um total de 800 elementos. Seguidamente, foi importada para o software de simulação para proceder à simulação da injeção da placa.

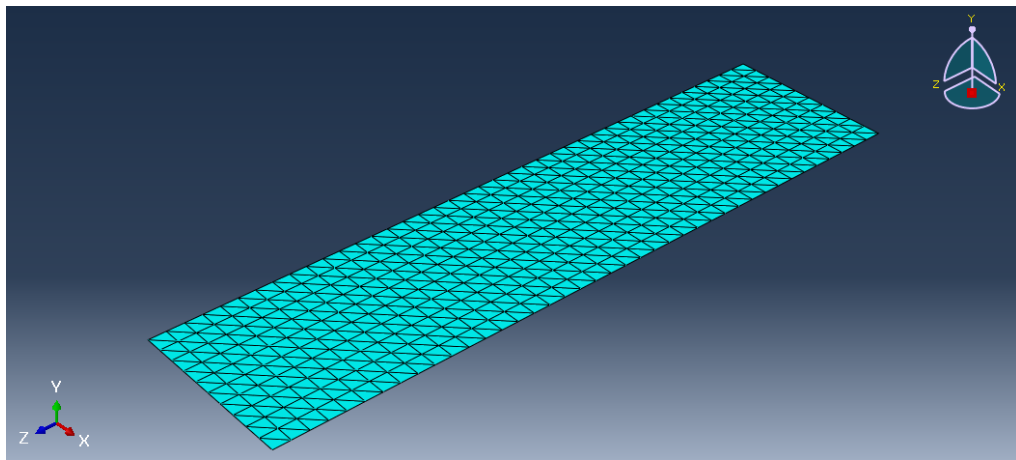


Figura 5.2 - Malha da Placa *Standard* obtida no *ABAQUS®*

Esta simulação foi realizada em 2D, pois a espessura da placa não é suficiente grande para haver necessidade de realizar uma simulação 3D, que iria ser muito mais demorada e envolveria a utilização de outros valores de permeabilidade nas diferentes direções. No caso de realizar uma simulação tridimensional iria haver a necessidade de criar nós na direção normal ao plano XZ o que consequentemente iria aumentar o número de nós utilizados nesse plano.

Neste caso foi considerada a isotropia do meio poroso, visto que a injeção é feita na totalidade da extremidade lateral da placa. Para variáveis de entrada (*Input*) serão consideradas a pressão de injeção e tendo obtido, dos trabalhos experimentais, os valores do FVF aparente e da permeabilidade

5.3 T-Rigidificador (*T-Stiffener*)

O T-Rigidificador que se trata do objetivo deste projeto faz também parte do trabalho de simulação realizado. Na figura 5.3 é possível visualizar a malha obtida com recurso ao programa *ABAQUS®*.

A malha obtida tem como objetivo maximizar o número de nós, já que o LIMS se encontra limitado a 2500 nós, e cada simulação é relativamente rápida. O Rigidificador foi obtido a partir de elementos triangulares estruturados, com dimensão de 8 mm. Esta malha tem cerca de 1512 elementos. Diminuir a dimensão dos elementos para 7 mm apenas iria aumentar o número de elementos no comprimento do Rigidificador, o que não iria trazer muito benefício; e ao utilizar elementos de 6 mm iria ultrapassar o limite de nós imposto pelo programa de simulação.

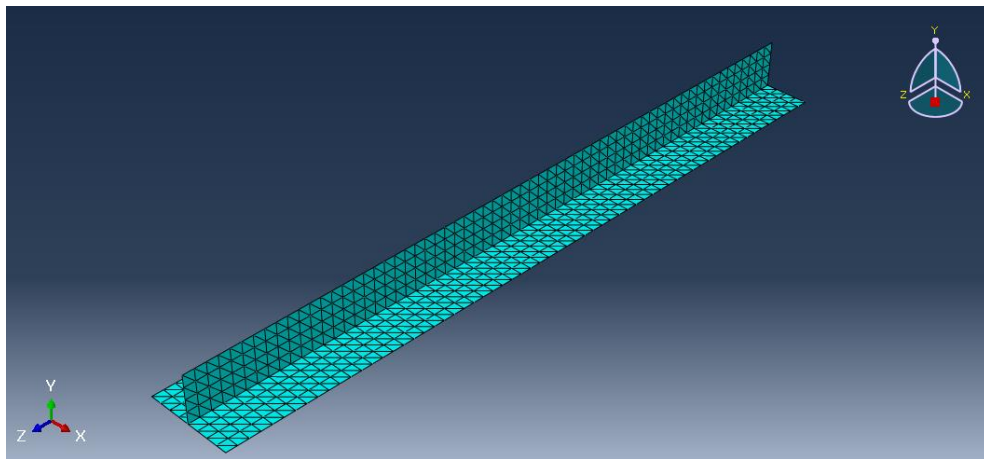


Figura 5.3 - Malha do T-Rigidificador obtida no *ABAQUS®*

Foram estudadas várias estratégias de infusão do T-Rigidificador, com o objetivo de otimizar os pontos entrada de resina para o processo

- 1) Em duas extremidades do mesmo lado do Rigidificador
- 2) Num dos topos do perfil em T
- 3) No centro da base do Rigidificador
- 4) Ao longo da parte superior do Rigidificador

Após a análise das várias estratégias de injeção, será escolhida a melhor opção tendo em conta a melhor impregnação do componente de forma a evitar vazios e zonas de má impregnação de resina.

6 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo será feita uma análise dos resultados obtidos do FVF e do VV seguindo a Metodologia apresentada no Capítulo 3. Também são obtidos valores experimentais da permeabilidade dos meios fibrosos e esse valor é utilizado para a simulação da infusão do T-Rigidificador.

6.1 Teor Aparente do Volume de Fibras

Após a obtenção das placas pelos processos de infusão previamente descritos foi possível medir a espessura das placas para cálculo do FVF aparente. Esses valores obtidos para os diferentes laminados são apresentados na Tabela 6.1. A espessura apresentada é um valor médio obtido a partir da medição da espessura em diversos pontos da placa obtida.

Tabela 6.1 - Resultados do FVF Aparente

Laminado	Processo	Espessura [mm]	Massa Específica [kg/m ³]	FVF Aparente [%]
A	Infusão Simples	3.82	1748	46.9
B	Infusão Simples	3.66	1805	48.9
D	CAPRI	3.46	1763	51.83
E	CAPRI	3.30	1830	54.36

No empilhamento das fibras foi utilizada uma camada de *spray* AIRTAC2, da AIRTECH®, que serviu como adesivo temporário para evitar a movimentação das camadas de

fibra, permitindo assim um melhor alinhamento. Esta camada pode ter influência na permeabilidade das fibras, devido ao próprio adesivo, ou então, devido a falhas na aplicação do mesmo. Seria importante a aplicação de uma camada uniforme deste *spray*, para a obtenção de resultados mais viáveis no futuro.

O laminado A apresentou várias entradas de ar durante a infusão. Foi também a primeira infusão realizada, houveram, portanto, algumas dificuldades na realização do saco de vácuo. Isto justifica o facto da espessura ser superior ao laminado B.

O laminado C foi excluído desta análise, pois os ciclos de compactação não foram corretamente efetuados. Isto originou uma média superior aos laminados obtidos pelo processo de infusão simples, tornando-se assim irrelevante para as conclusões a retirar do trabalho realizado.

Pelo processo de Infusão CAPRI, registaram-se espessuras mais uniformes, muito devido aos ciclos de compactação efetuados. No corte das amostras para o ensaio de queima, que foram retiradas do centro do laminado, foi também possível verificar espessuras mais uniformes relativamente ao processo de infusão simples.

Com a repetição do procedimento foi possível reduzir a espessura do laminado e consequentemente aumentar o FVF Aparente. Foi verificado um aumento de 4% no volume de fibra na Infusão Simples e cerca de 10% no processo CAPRI.

Essa diminuição de espessura também é visível nos diferentes processos utilizados: o processo de compactação (*debulking*) obteve o efeito pretendido e foi possível um aumento de 10% do volume de fibra face à infusão simples.

6.2 Resultados dos Ensaios de Queima

O procedimento e fórmulas utilizadas no ensaio de queima são apresentadas no subcapítulo 3.1, seguindo a norma ASTM D2734-09. foram utilizadas pelo menos 5 amostras de cada laminado, de ambos os processos de infusão utilizados. Na Figura 6.1 é visível um esquema do corte das amostras para os testes de queima realizados.

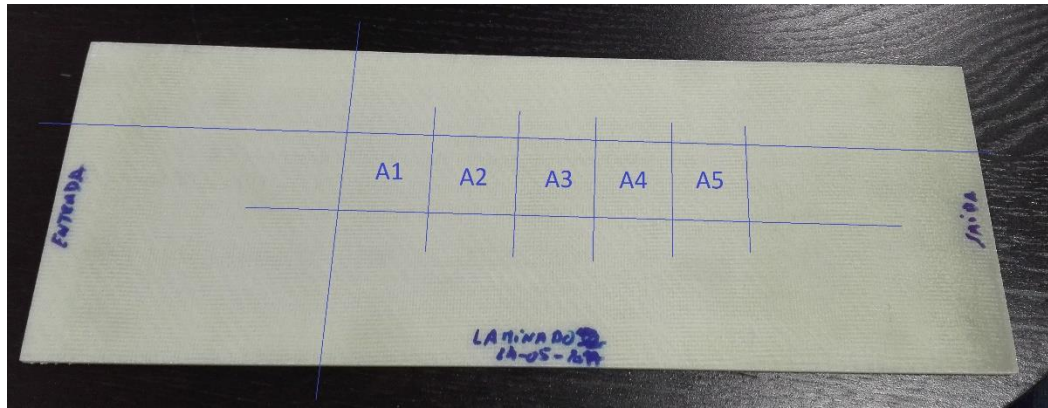


Figura 6.1 - Esquema de corte das amostras para ensaios de queima

Na tabela 6.2, são apresentados os resultados obtidos do ensaio de queima, onde é possível verificar a percentagem de resina que foi perdida por ignição, notando que o remanescente da percentagem representa a percentagem de massa das fibras (FWF ou w_f) das amostras de cada laminado. A partir destes valores obtidos dos ensaios de queima é possível calcular o desvio padrão das amostras.

Tabela 6.2 - Resultados do FWF obtidos do ensaio de queima

Amostra	Massa Resina [%]	FWF [%]	s – Desvio Padrão [%]
A	33.51	66.49	0.57
B	33.07	66.93	0.26
D	25.95	74.05	0.08
E	25.72	74.28	0.13

A partir dos valores da Tabela 6.2 é possível calcular o teor de volume de fibras, que são comparados com a estimativa do FVF aparente e também é apresentado o volume de vazios; valores que se encontram na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Resultados obtidos do FVF e VV a partir do FWF

Amostra	FVF Aparente [%]	FVF [%]	VV [%]
A	46.89	47.50	2.12
B	48.95	47.99	- 0.70
D	51.83	56.55	7.63
E	54.36	56.84	4.32

É possível concluir que os valores de desvio padrão se encontram em valores aceitáveis segundo a norma utilizada. No entanto, é normal haverem variações de espessura devido ao facto do laminado apresentar pequenas variações de espessura.

Os laminados obtidos pelo processo de infusão CAPRI apresentam desvios padrão menores, devido ao facto deem ter sido feitos ciclos de compactação numa etapa pré-infusão, o que deixou o laminado com uma espessura mais uniforme.

As amostras dos laminados obtidos pelo processo CAPRI apresentam uma percentagem de massa de resina inferior às amostras do processo de Infusão Simples, e consequentemente um maior teor de volume de fibras. Isto é bastante relevante para validação deste processo, pois um maior FVF conduz a um menor VV, o representa melhores propriedades mecânicas do material compósito.

Comparando os valores de teor de volume de fibra aparente, e os valores obtidos através do ensaio de queima verificamos que em grande parte os resultados obtidos na queima chegam mesmo a ser inferiores. Podemos, portanto, utilizar esta estimativa como uma aproximação por defeito do valor real do teor de volume de fibras.

Deveria de ter sido utilizado um instrumento de medição de espessura de maior precisão, já que foi utilizado um paquímetro. Esta medição de espessura tem enorme influencia na densidade medida do laminado, M. Duas hipóteses que confirmam este facto são:

- O teor de volume de vazios é maior no processo CAPRI, o que não faz qualquer sentido, visto que o FVF é superior ao processo de Infusão Simples.

- No laminado B, obtido pelo processo de Infusão Simples, o teor de volume de vazios é negativo.

6.3 Frente de resina

A frente de resina foi analisada para as placas obtidas segundo a Metodologia apresentada no subcapítulo 3.3. São apresentados os gráficos da posição da frente de fluxo em função do tempo e também da posição da frente de fluxo ao quadrado, a partir dos quais é possível obter uma reta de declive m . A partir desse declive é possível atingir um valor experimental da permeabilidade que será utilizado para caracterização do material utilizado e posterior simulação do T-Rigidificador.

6.3.1 Infusão Simples

A partir da gravação do processo de Infusão Simples foi possível obter os gráficos da posição de frente de fluxo em função do tempo para os diferentes Laminados (A e B).

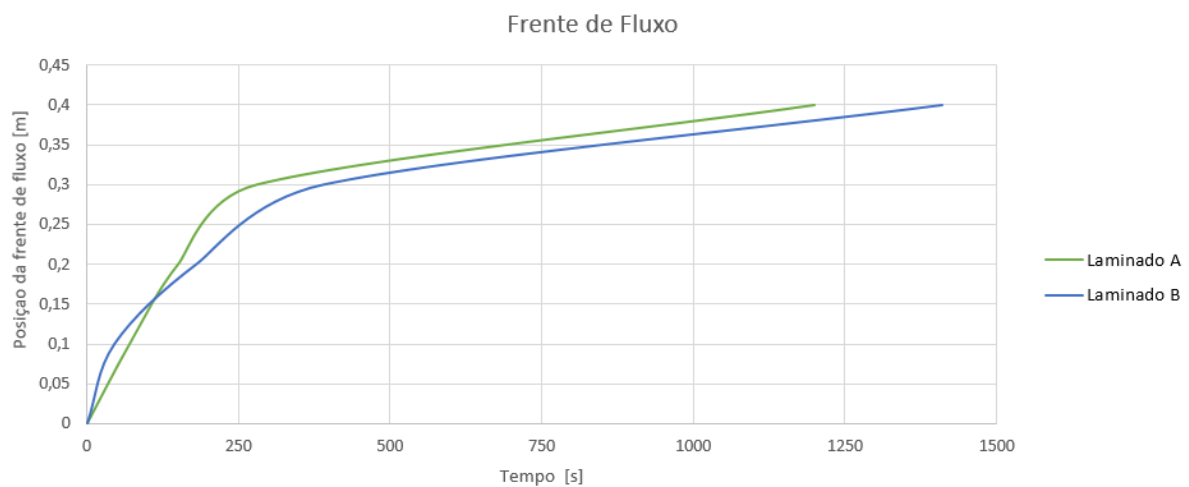


Figura 6.2 - Frente de resina dos diferentes laminados na Infusão Simples

Elevando a posição de frente de fluxo ao quadrado é possível obter um novo gráfico, a partir do qual se retira uma reta de declive m , que servirá para determinar um valor experimental de permeabilidade.

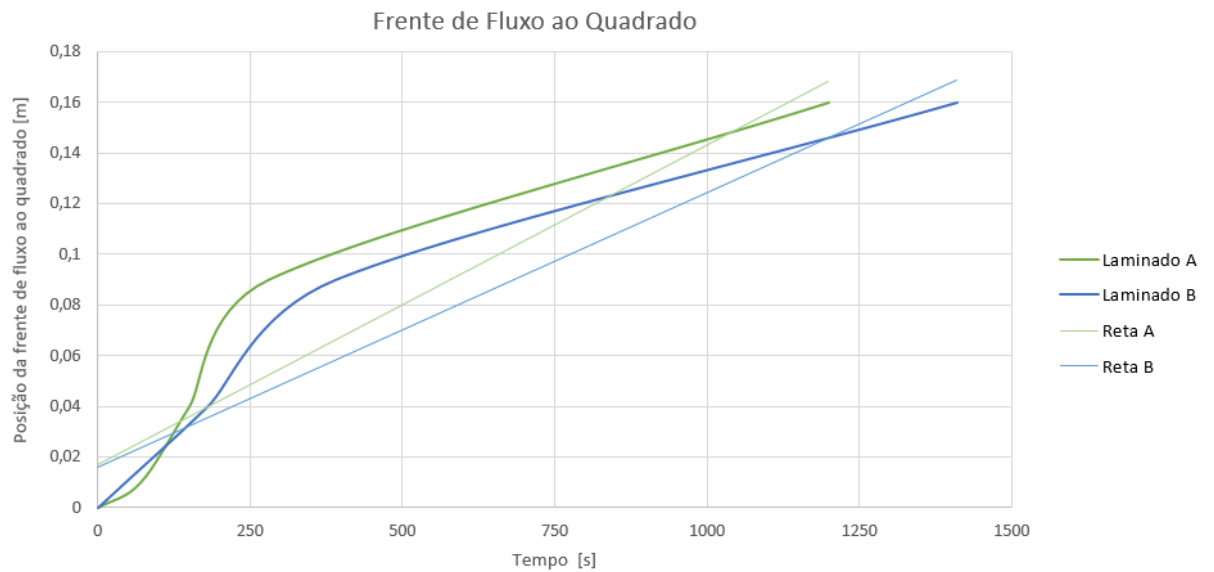


Figura 6.3 - Frente de resina ao quadrado dos diferentes laminados na Infusão Simples

6.3.2 Infusão CAPRI

A partir da gravação do processo de infusão CAPRI foi possível obter os gráficos da posição de frente de fluxo em função do tempo para os diferentes Laminados (C, D e E).

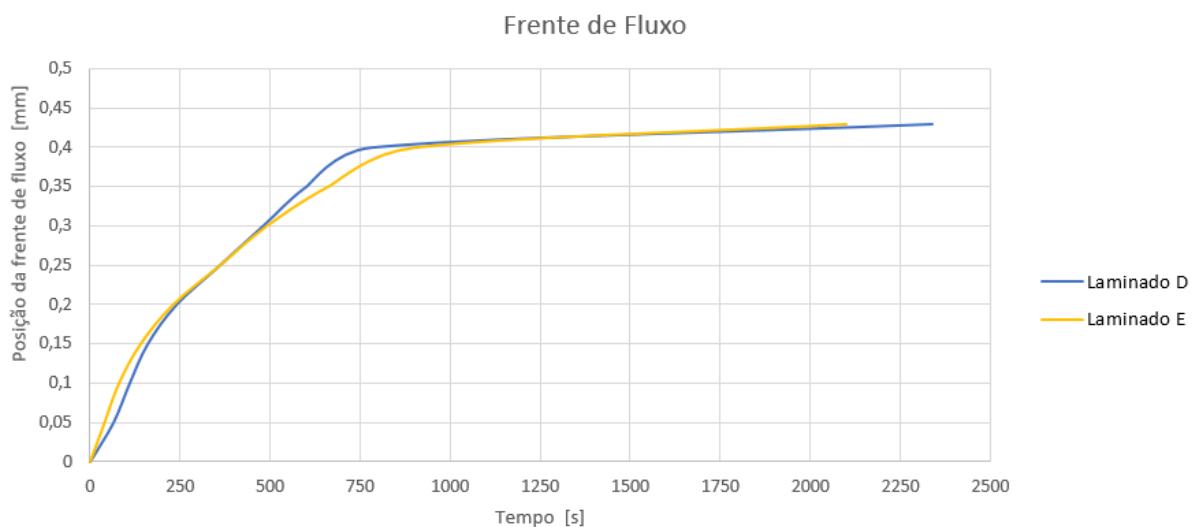


Figura 6.4 - Frente de resina dos diferentes laminados na Infusão CAPRI

Elevando a posição de frente de fluxo ao quadrado é possível obter um novo gráfico, a partir do qual se retira uma reta de declive m , que servirá para determinar um valor experimental de permeabilidade.

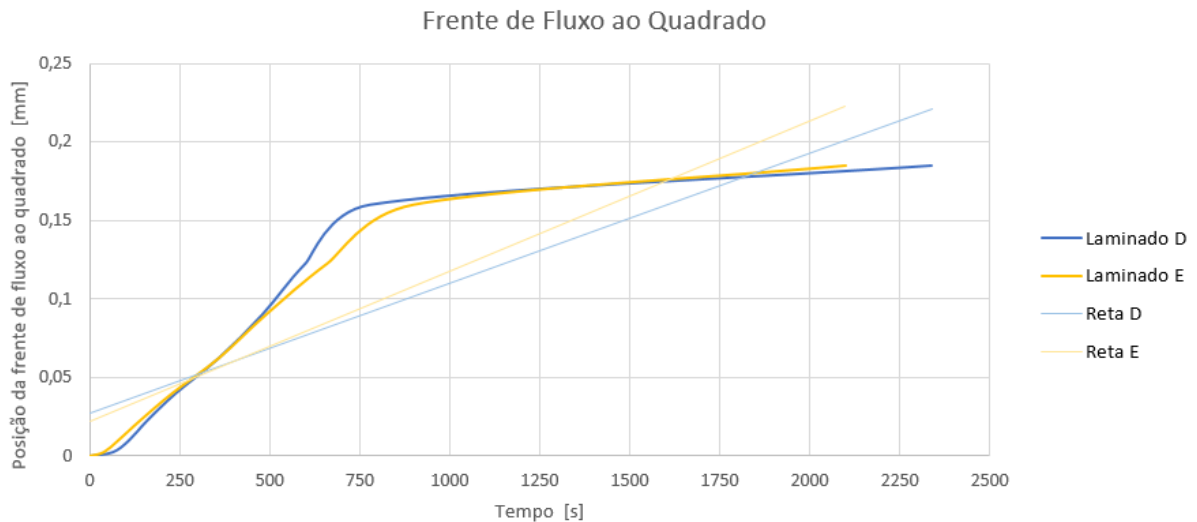


Figura 6.5 - Frente de resina ao quadrado dos diferentes laminados na Infusão CAPRI

6.3.3 Análise dos Resultados Experimentais da Permeabilidade

Na tabela 6.4 são apresentados os valores obtidos para os declives das retas de ambos os processos. São apresentados também o coeficiente de correlação das retas, os valores experimentais da permeabilidade obtidos e o erro da posição de frente de fluxo. Para o cálculo do erro foram avaliadas quatro posições de frente de fluxo no caso da Infusão Simples e nove posições para o caso do processo CAPRI.

Após a análise dos gráficos posição-tempo, é possível verificar que não foi obtida uma parábola como era esperado, e, conseqüentemente, o gráfico posição da frente de fluxo ao quadrado também não é uma reta. Isto deve-se, essencialmente, ao diferencial de pressão utilizado durante o processo de infusão. Havia a necessidade de realizar uma boa impregnação das fibras e, por esse motivo foi utilizado um diferencial de pressão mais baixo. Isto levou a um gráfico posição-tempo com duas zonas distintas: uma curva inicial e uma reta. Outra forma de evitar esta zona de velocidade constante seria evitar que a infusão se prolongasse durante tanto tempo, cortando previamente o canal de alimentação de resina.

Tabela 6.4 - Resultados obtidos para o valor experimental da permeabilidade

Laminado	Declive	R²	Permeabilidade [m²]	Erro [%]
A	1.260E-04	0.882	1.137E-10	22.0
B	1.084E-04	0.915	9.409E-11	22.7
D	8.304E-05	0.722	9.714E-11	8.1
E	9.583E-05	0.813	1.062E-11	6.4

Como era esperado, a permeabilidade das fibras diminuiu com a realização de ciclos de compactação das fibras do processo CAPRI. Dentro do mesmo processo utilizado, a diferença entre permeabilidades medidas é muito pequena e pode ser considerada desprezável.

É possível concluir que com o aumento de número de posições analisadas, como foi o caso no processo CAPRI, o erro diminui de 22% para um valor mais aceitável, inferior a 10%.

6.4 Simulação da Injeção

Neste Subcapítulo serão apresentados os resultados obtidos das simulações realizadas no *software* LIMS.

6.4.1 Infusão da Placa *Standard*

Na primeira etapa da simulação houve uma tentativa de replicar os procedimentos experimentais realizados através dos processos de Infusão Simples e CAPRI, para verificar se existe conformidade entre o processo experimental e a simulação.

Para o processo de simulação serão utilizados os valores de permeabilidade obtidos experimentalmente que tiveram um menor erro de medição na análise de frente de resina.

- $K_{\text{Infusão Simples}} = 1.137\text{E-}10 \text{ [m}^2\text{]}$
- $K_{\text{Infusão CAPRI}} = 1.062\text{E-}10 \text{ [m}^2\text{]}$

Processo de Infusão Simples

Para o processo de Infusão Simples foi realizada uma primeira simulação com um teor de volume de fibra de 50%. Diminuindo a permeabilidade das fibras, o tempo de injeção também irá aumentar.

Na Figura 6.6 estão representados a verde os pontos obtidos a partir do primeiro FVF utilizado de 50%. A azul e a amarelo é efetuada uma previsão da permeabilidade das fibras, para os laminados A e B respetivamente, a partir do FVF Aparente e do tempo decorrido do processo de infusão.

É obtida uma linha de tendência de potência através da variação do valor da permeabilidade, a partir da qual é possível replicar o tempo de infusão obtida experimentalmente com um erro inferior a 1%.

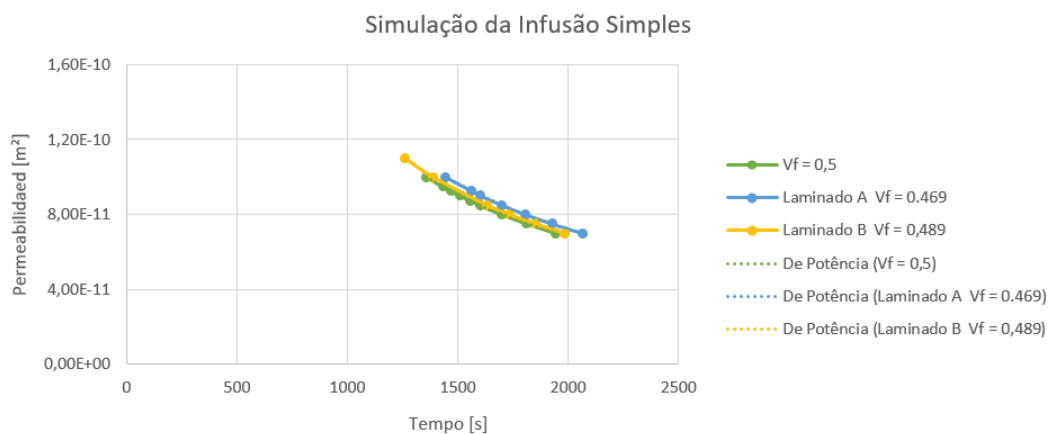


Figura 6.6 - Simulação da Placa *Standard* para o processo de Infusão Simples

Processo de Infusão CAPRI

Para o processo de Infusão CAPRI foi realizada uma primeira simulação com um teor de volume de fibra de 50%. Diminuindo a permeabilidade das fibras, o tempo de injeção irá aumentar.

Na Figura 6.7 estão representados a verde os pontos obtidos a partir do primeiro FVF utilizado de 50%. A azul e a amarelo é efetuada uma previsão da permeabilidade das fibras, para os laminados D e E respectivamente, a partir do FVF aparente e do tempo decorrido do processo de infusão. O laminado C não foi considerado para a simulação, pois o processo de compactação (*debulking*) não foi efetuado corretamente.

É obtida uma linha de tendência de potência através da variação do valor da permeabilidade, a partir da qual é possível replicar o tempo de infusão obtida experimentalmente com um erro inferior a 1%.

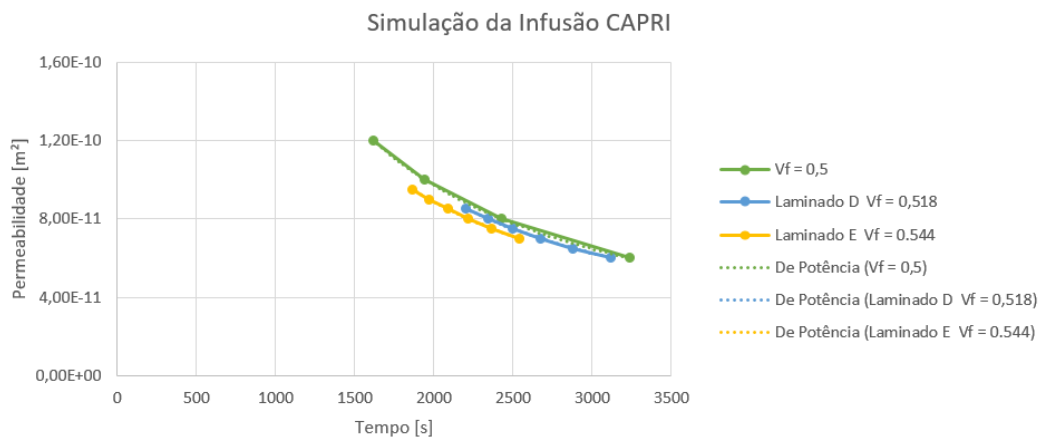


Figura 6.7 - Simulação da Placa *Standard* para o processo de Infusão CAPRI

Os valores das curvas de tendência obtidas para cada simulação, encontram-se na Tabela 6.5. As curvas de tendência utilizadas têm um coeficiente de correlação de um.

Tabela 6.5 - Resultados da permeabilidade obtidos pela simulação da Placa Standard

Laminado	Tempo de Infusão	Linha de Tendência	Permeabilidade [m²]	R²
A	1560	$y = 1.4425E - 07x^{-1}$	9.247E-11	1.0
B	1380	$y = 1.3954E - 07x^{-1}$	1.011E-10	1.0
D	2340	$y = 1.8793E - 07x^{-1}$	8.031E-11	1.0
E	2100	$y = 1.6610E - 07x^{-1}$	7.910E-11	1.0

6.4.2 Comparação dos Valores de Permeabilidade

Na Tabela 6.6 é possível comparar os valores experimentais da permeabilidade obtidos da análise da frente de resina com os obtidos na simulação.

Tabela 6.6 – Resumo dos valores da permeabilidade obtidos por via experimental e simulação

Laminado	Permeabilidade [m²]		Erro [%]
	Experimental	Simulação	
A	1.137E-10	9,247E-11	19
B	9.409E-11	1,011E-10	7
D	9.714E-11	8,031E-11	17
E	1.062E-10	7,910E-11	26

Seguidamente, serão comparadas as gravações da frente de resina com os resultados obtidos a partir da simulação. Foram comparadas as posições de frente de resina em instantes semelhantes da infusão para verificar se é possível replicar a infusão obtida experimentalmente no programa de simulação.

É possível verificar que a frente de resina não é uniforme no procedimento experimental, muito devido imperfeições do tecido da fibra de vidro utilizado; é algo que é impossível de controlar. O posicionamento dos tecidos técnicos também é bastante importante, principalmente o posicionamento da rede de distribuição. Esta irá controlar a uniformização da frente de resina, quer na parte lateral do empilhamento das fibras, quer no final da infusão: antes da resina atingir a espiral de saída.

Infusão Simples (Placa A: t=1560s)

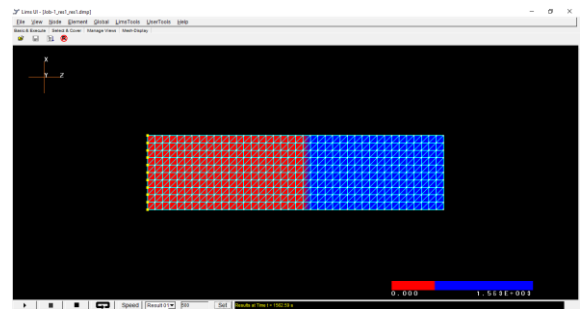
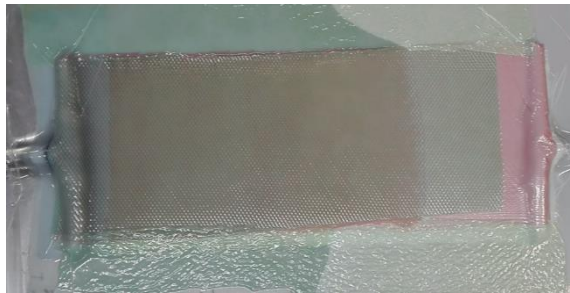
FVF aparente = 46.9 %

$P_{\text{injeção}} = 50\,000\text{ Pa}$

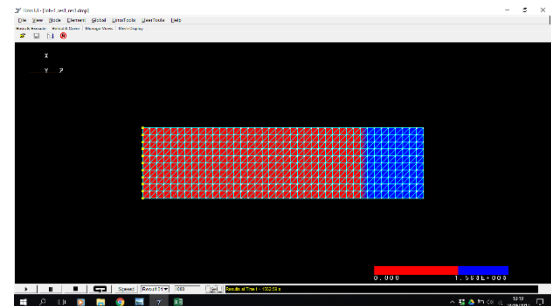
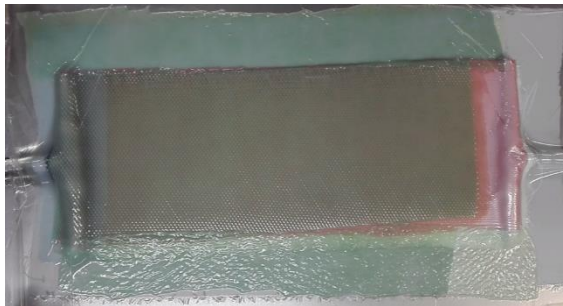
$K_{\text{Experiemental}} = 1.137\text{E-}10\text{ [m}^2\text{]}$

$K_{\text{Simulação}} = 9.247\text{E-}11\text{ [m}^2\text{]}$

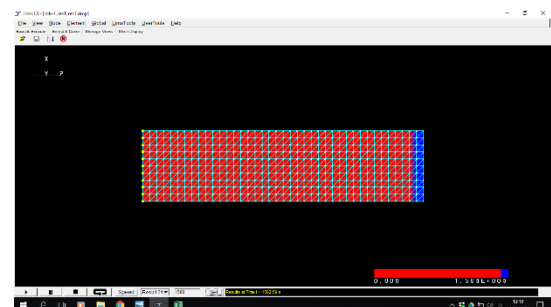
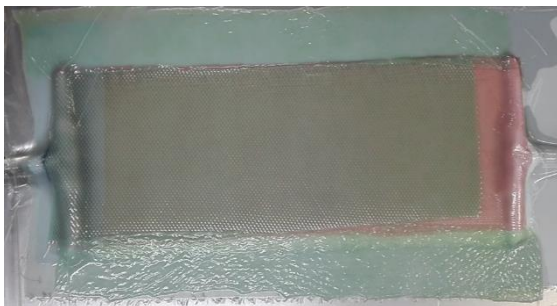
$t = 500\text{ s}$



$t = 1000\text{ s}$



$t = 1500\text{ s}$



Infusão CAPRI (placa E: t=2100s)

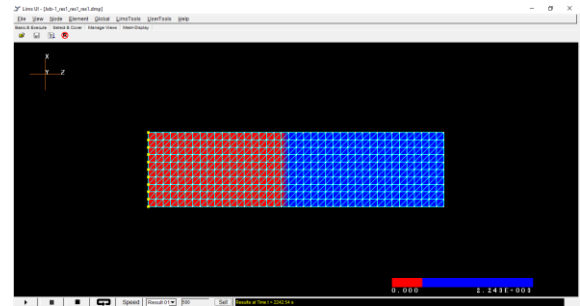
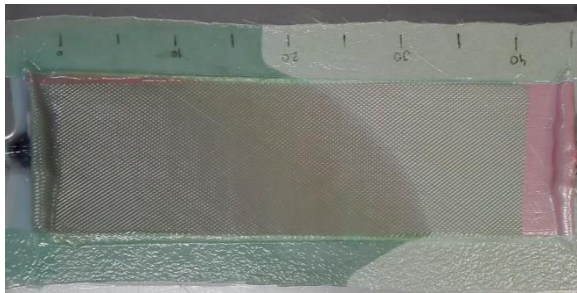
FVF aparente = 54.4 %

$P_{\text{injeção}} = 35\,000\text{ Pa}$

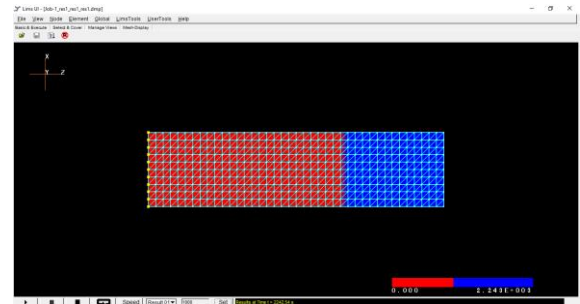
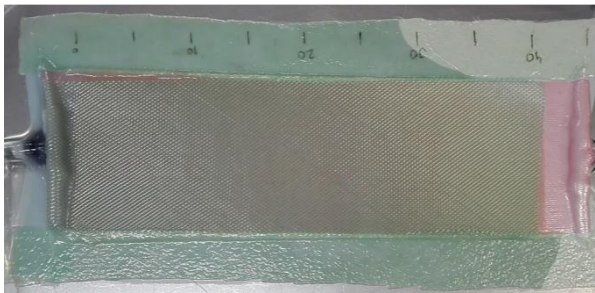
$K_{\text{Experimental}} = 1.062\text{E-}10\text{ [m}^2\text{]}$

$K_{\text{Simulação}} = 7.910\text{E-}11\text{ [m}^2\text{]}$

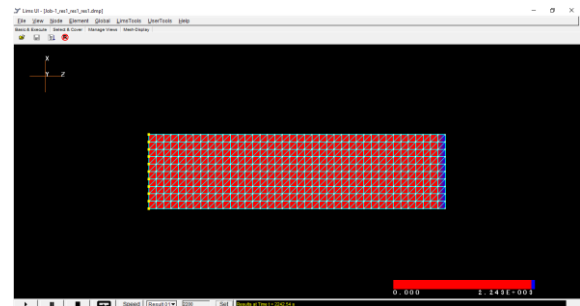
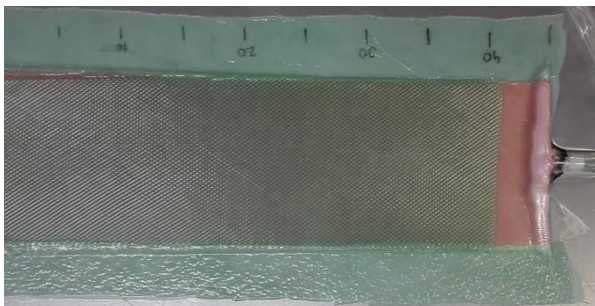
$t = 500\text{ s}$



$t = 1000\text{ s}$



$t = 2000\text{ s}$



6.4.3 Infusão do T-Rigidificador

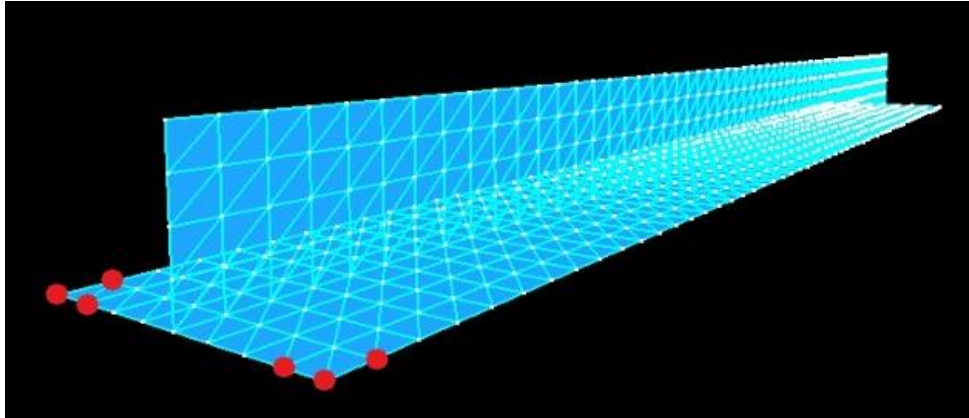
Seguidamente serão apresentados os resultados obtidos das diferentes estratégias de injeção. Serão utilizados nesta simulação os valores experimentais da permeabilidade obtidos da análise da frente de resina.

Estratégia de Injeção para Infusão Simples

Para cada uma das estratégias estudadas, é possível ver os pontos de injeção utilizados, representados a vermelho, e depois a variação da frente de fluxo a partir dos pontos de injeção escolhidos. A parte do T-Rigidificador a vermelho representa a frente de resina, enquanto que, a azul, está representada a zona do componente que ainda não se encontra impregnada pela frente de fluxo.

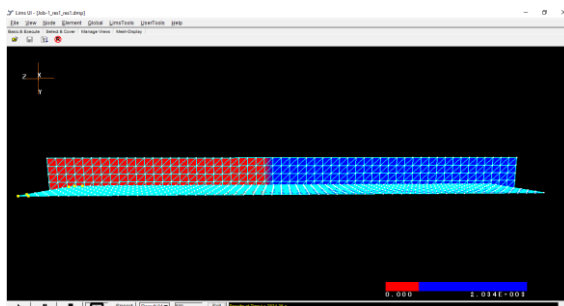
1) Em duas extremidades do mesmo lado do T-Rigidificador

Pontos de Injeção

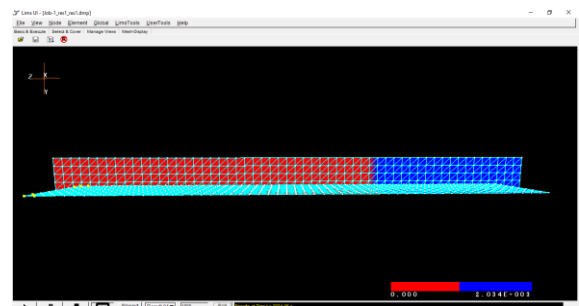


Frente de Fluxo (t = 2034 s)

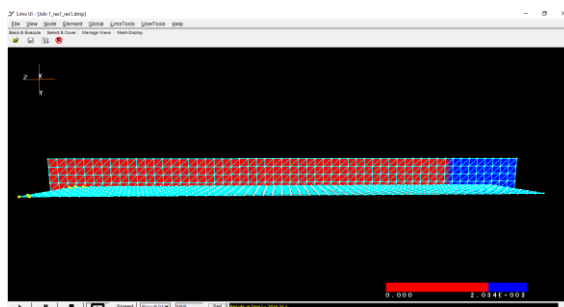
t = 500 s



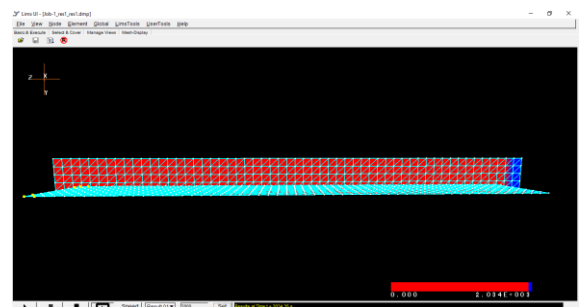
t = 1000 s



t = 1500 s

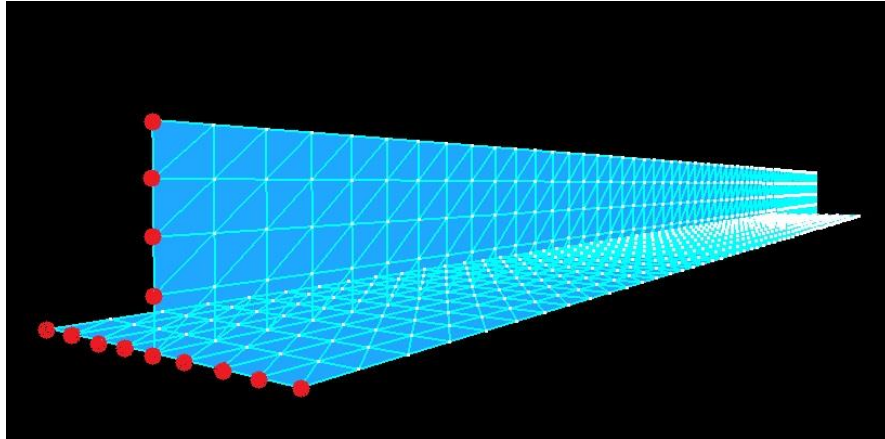


t = 2034 s



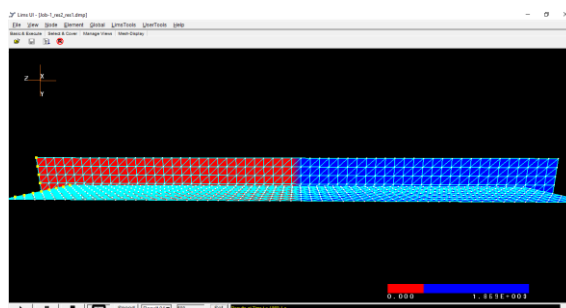
2) Num dos topos do perfil em T

Pontos de Injeção

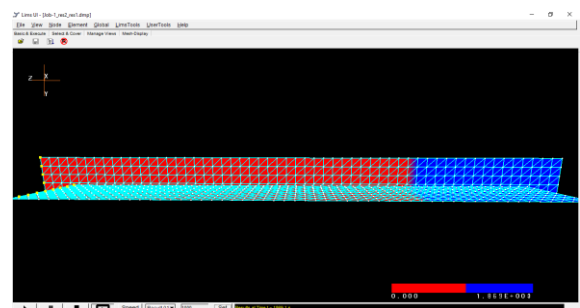


Frente de Fluxo (t = 1869 s)

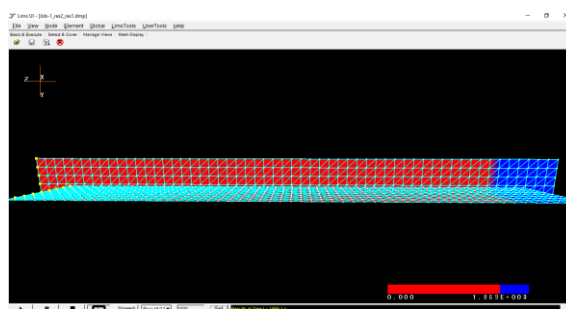
t = 500 s



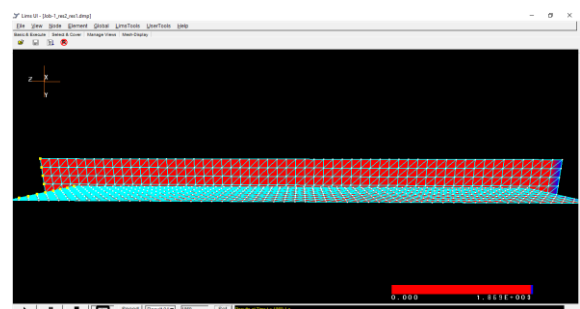
t = 1000 s



t = 1500 s

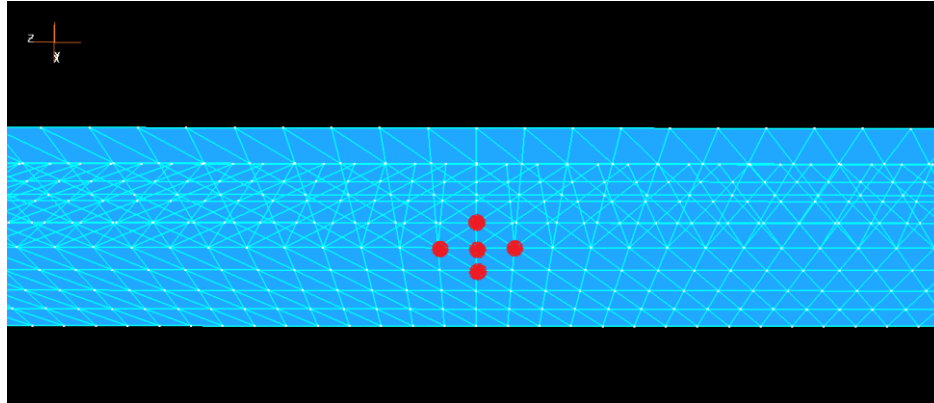


t = 1860 s



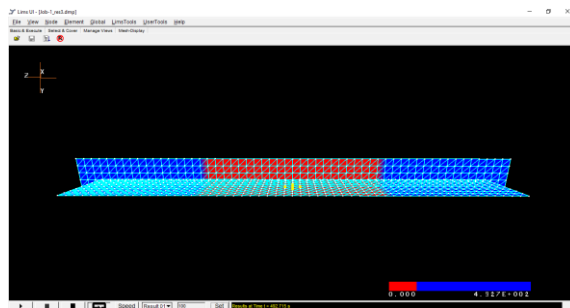
3) No centro da base do T-Rigidificador

Pontos de Injeção

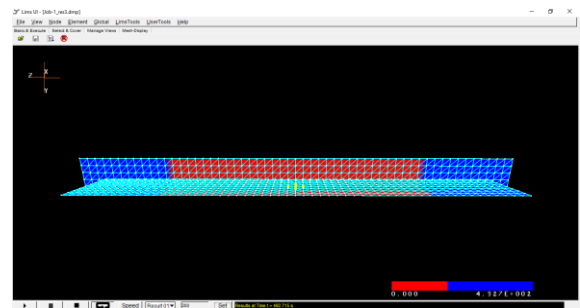


Frente de Fluxo (t = 493 s)

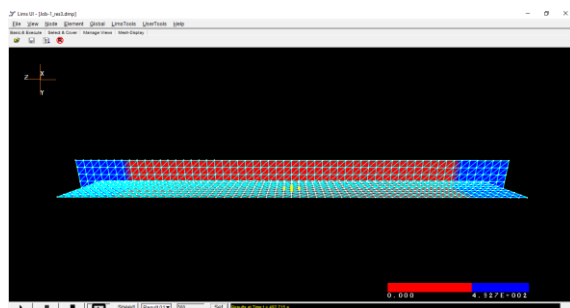
t = 100 s



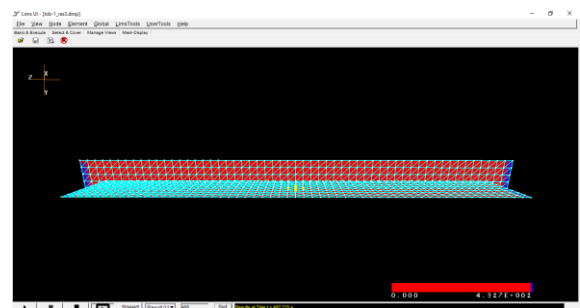
t = 200 s



t = 300 s

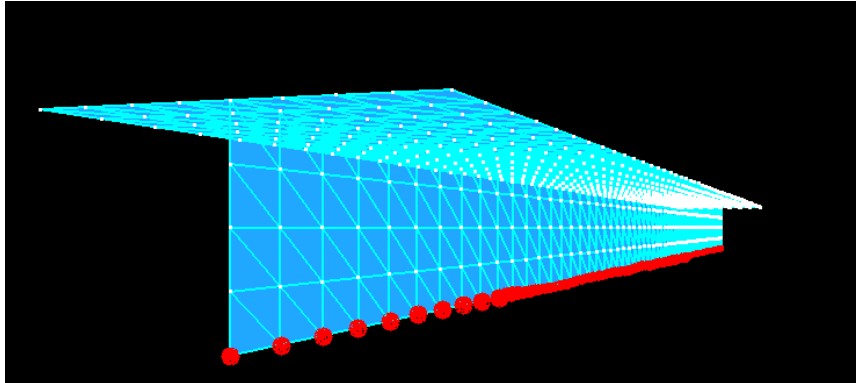


t = 490 s



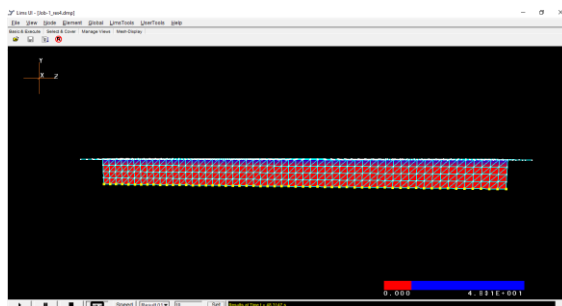
4) Ao longo da parte superior do T-Rigidificador

Pontos de Injeção

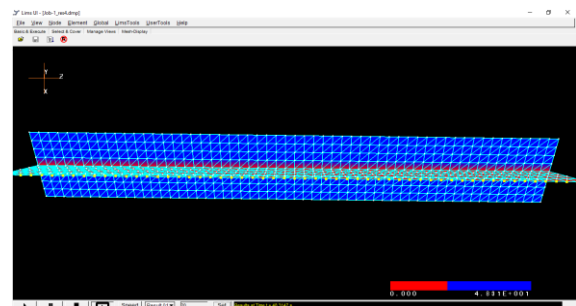


Frente de Fluxo (t = 2034 s)

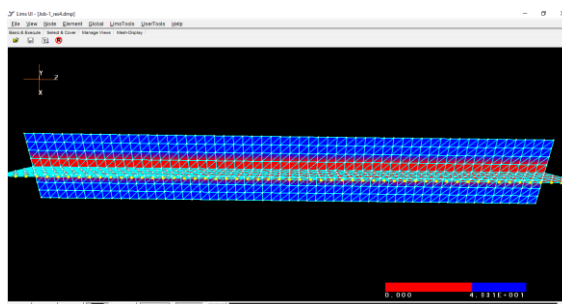
t = 10 s



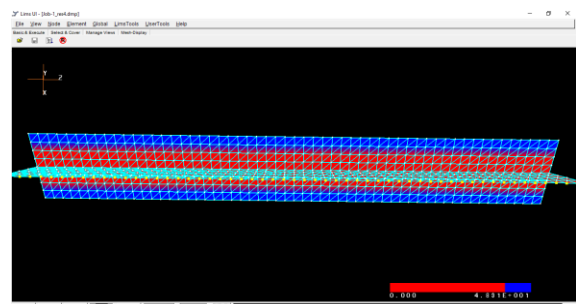
t = 20 s



t = 30 s



t = 40 s



Na Tabela 6.7 é possível verificar os tempos resultantes da injeção do processo de Infusão Simples (Pinjeção = 50 000 Pa). Foram utilizados o valor da viscosidade utilizado anteriormente ($\mu = 0.17 \text{ Pa.s}$), o valor de permeabilidade obtido experimentalmente com menor erro de medição e um teor de volume de fibras de 50%.

Tabela 6.7 - Resultados da Simulação do T-Rigidificador para o Processo de Infusão Simples

Estratégia	FVF [%]	Infusão Simples	Tempo de injeção	
		Permeabilidade [m^2]	[s]	[min]
1	50	1.137E-10	2034	33.9
2	50	1.137E-10	1869	31.2
3	50	1.137E-10	493	8.2
4	50	1.137E-10	48	0.8

Após a análise dos tempos de injeção é possível verificar que a melhor estratégia é a estratégia número 4 que, por larga margem, é a solução mais rápida.

Infusão CAPRI do T-Rigidificador

Seguidamente, na Tabela 6.8 é possível ver o tempo resultante da injeção do processo de Infusão CAPRI para a estratégia de injeção selecionada ($P_{injeção} = 35\,000\text{ Pa}$). Foram utilizados o valor da viscosidade utilizado anteriormente ($\mu = 0.17\text{ Pa.s}$), o valor de permeabilidade obtido experimentalmente com menor erro de medição e um teor de volume de fibras de 60%.

Tabela 6.8 - Resultado da Simulação do T-Rigidificador para o Processo CAPRI

Estratégia	FVF [%]	CAPRI	Tempo de injeção	
		Permeabilidade [m^2]	[s]	[min]
4	60%	1.062E-10	59	0.98

Variação da permeabilidade na curvatura do T-Rigidificador

Na Figura 6.8 é possível verificar os pontos que foram selecionados para atribuição do valor de permeabilidade segundo a Equação de *Hagen-Poiseuille*, descrita no Subcapítulo 2.5.1.

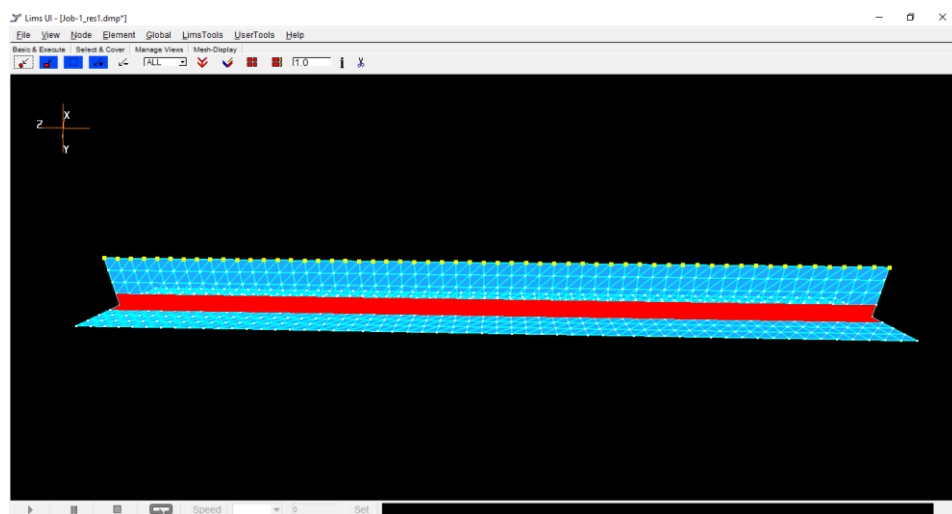


Figura 6.8 - Nós da malha com permeabilidade diferente para simulação do canal rápido

Na Tabela 6.9 é considerado o efeito do raio de curvatura do T-Rigidificador. Os parâmetros de entrada são os mesmos utilizados anteriormente. Para a zona da curvatura do perfil do T-*Stiffener*, foi utilizado um raio de 4 mm para o cálculo do valor de permeabilidade. Este valor foi utilizado com a intenção de obter um valor máximo para a permeabilidade para aquela zona, sabendo que o raio do canal rápido nunca irá ter estas dimensões.

Tabela 6.9 - Resultado da Simulação do T-Rigidificador para o Processo CAPRI com o efeito da curvatura do perfil

Estratégia	FVF [%]	CAPRI		Tempo de injeção	
		Permeabilidade [m ²]		[s]	[min]
		T- <i>Stiffener</i>	Curvatura		
4	60%	1.062E-10	2.00E-06	45	0.75

O tempo de enchimento é relativamente curto, portanto, a variação da permeabilidade na curvatura não é muito relevante. A estratégia de injeção escolhida, como é ao longo do rigidificador, também atenua bastante este efeito. No software de simulação não é possível verificar este efeito de canal rápido, em que a frente de resina escoar mais rapidamente na zona da curvatura do perfil. No entanto, esta variação pode ser verificada no tempo de injeção do componente.

Se a estratégia de injeção escolhida fosse a estratégia 2 (no topo do perfil T), teria muito mais influencia, devido ao canal rápido existente no interior da curvatura do perfil “T”, como é explicitado no subcapítulo 4.1.4.

7 CONCLUSÕES

A indústria aeronáutica tem vindo a desenvolver-se a um ritmo exponencial, tal levou à implementação de materiais compósitos neste setor e também ao desenvolvimento de novos processos ou até mesmo uma melhoria de processos existentes e que já se encontram implementados.

Ambos os processos de infusão de resina realizados experimentalmente requerem bastante experiência, quer na preparação da montagem do processo, quer no controlo do saco de vácuo durante o processo no caso de ocorrer entrada de ar. O processo CARPI torna-se bastante moroso relativamente ao processo de Infusão Simples, devido à necessidade de realizar ciclos de compactação através do procedimento manual de ligar e desligar a bomba de vácuo. No entanto, com este processo foi obtido um melhor acabamento da superfície do laminado, devido aos ciclos de compactação (*debulking*) que permitiu uma maior compactação entre as camadas de fibra.

Como era esperado, nos Ensaios de Queima, ficou comprovado que os laminados obtidos pelo processo CAPRI têm um maior teor de volume de fibras, o que conduz a melhores propriedades mecânicas, necessárias nos processos de produção de componentes aeronáuticos. Para a medição do teor de volume de vazios a partir dos Ensaios de Queima é necessária a utilização de uma estratégia menos grosseira. É aconselhada a uma análise ao microscópio para posterior avaliação, através de extrapolação, do teor de volume de vazios, necessária para a validação deste processo para componentes aeronáuticos.

Com o programa de simulação foi realizada apenas uma pré-avaliação, mas é possível concluir que se trata de uma boa ferramenta para utilizar nos processos de infusão de resina. Posteriormente será necessário fazer uma investigação mais profunda sobre outros recursos que este programa de simulação poderá oferecer.

7.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, é requerida a implementação deste estudo no sistema epóxi/fibra de carbono e a realização de uma pesquisa bibliográfica para posterior avaliação do teor de volume de fibras e de vazios do novo material a ser utilizado. Para isso será também necessária a realização do molde para obtenção do T-Rigidificador.

É necessária também a realização de ensaios de permeabilidade para uma caracterização mais pormenorizada do material em estudo.

Será também necessário fazer um estudo complementar, em 3D, do processo de injeção. Um outro estudo baseado na cinética da cura, pois é uma etapa crucial no processo de infusão.

O desenvolvimento de um modelo de custos para a implementação e possível industrialização deste processo é, também, necessário.

REFERÊNCIAS

- Advani, S.G., and K.T. Hsiao. 2012. *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*: Elsevier Science.
- AirbusGroup. 2016. "Airbus' InFactory Solutions is delivering for the future with products and services for connected manufacturing." <http://www.airbusgroup.com/int/en/corporate-social-responsibility/latest-news/infactory-solutions-intelligent-industry-connected-production.html>.
- Alms, Justin B, Nuno Correia, Suresh G Advani, Edu Ruiz, and CT Gonçalves. 2010. "Experimental procedures to run longitudinal injections to measure unsaturated permeability of LCM reinforcements." *FCCPM Collaboration*.
- ASTM. D2584-94 1994. Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins. ASTM.
- ASTM. D2734-09 2012. Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics. ASTM.
- Batey, ANGUS. 2010. "Boeing's billion dollar gamble: Inside the world's biggest building, where the new 787 Dreamliner plane is built." DailyMail. <http://www.dailymail.co.uk/home/moslive/article-1308128/Boeings-billion-dollar-gamble-Inside-worlds-biggest-building-new-787-Dreamliner-plane-built.html>.
- Black, Sara. 2010. "SQRTM enables net-shape parts." *Composite World*, accessed abril 2017. <http://www.compositesworld.com/articles/sqrtm-enables-net-shape-parts>.
- Boisse, P. 2015. *Advances in Composites Manufacturing and Process Design*: Elsevier Science.
- Campbell, F.C. 2003. *Manufacturing Processes for Advanced Composites*: Elsevier Science.
- Cerqueira, José Carlos Machado. 2008. "Monitorização do fluxo no processo de moldação por transferência de resina (RTM)." MSc, INEGI, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Correia, Nuno André Curado Mateus. 2004. "Analysis of the vacuum infusion moulding process." PhD, University of Nottingham.
- Dhyani, Aupam. 2009. "VARTM Process With Some Modifications." accessed junho 2017. <https://www.slideshare.net/anupamdhyani/ms-thesis-presentation-1448689>.
- Di Fratta, Claudio, Florian Klunker, Paolo Ermanni, and others. 2013. "A methodology for flow-front estimation in LCM processes based on pressure sensors." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 47:1-11. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.11.008>.
- FAA. 2012. *Aviation Maintenance Technician Handbook-Airframe*. Edited by Aviation Supplies & Academics. Vol. vol. 2. Federal Aviation Administration: FAA Handbooks Series.
- Gardiner, Ginger 2010. "Double-bag infusion: 70% fiber volume?". *Composite World*, accessed maio 2017.

- Heider, and Hsiao. 2012. "Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) in polymer matrix composites."
- Hutten, Irwin Marshall. 2007. *Handbook of Nonwoven Filter Media*: Butterworth-Heinemann.
- INEGI. 2011. accessed maio 2017. <http://www.inegi.pt/>
- Jain, Hemendra Kumar 2009. "LAMINATED COMPOSITE STIFFENED PANELS: APPLICATIONS AND BEHAVIOUR." Civil Engineering Conference Innovation Without Limit (CEC-09), September 18-19, 2009, NIT Hamirpur, pp. 89-96.
- JEC. 2014. "Semipermeable Vacuum Assisted Process membrane systems." <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/semipermeable-vacuum-assisted-process-membrane-systems>.
- JEC. 2016. "Compression RTM — An Efficient Method." JEC Composites, accessed junho 2017. <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/compression-rtm-%E2%80%94-efficient-method>.
- Laurenzi, S., and M. Marchetti. 2012. *Advanced Composite Materials by Resin Transfer Molding for Aerospace Applications*: INTECH Open Access Publisher.
- Lensfeld, H., F. Wolff-Fabris, J. Kramer, J. Lacalle, and V. Altstadt. 2016. *Composite Tecnology : Prepregs and Monolithic Part Fabrication*: HANSER.
- Mason, Karen. 2006. "Autoclave Quality Outside The Autoclave?". Composite World. <http://www.compositesworld.com/articles/autoclave-quality-outside-the-autoclave>
- Mesogitis, T.S., A.A. Skordos, A.C. Long, and others. 2014. "Uncertainty in the manufacturing of fibrous thermosetting composites: A review." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 57:67-75. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.11.004>.
- ModernAirliners. 2014. "Boeing 787 Dreamliner Specs." Modern Airliners, accessed junho 2017. <http://www.modernairliners.com/boeing-787-dreamliner/boeing-787-dreamliner-specs/>.
- MTorres. 2012. "A High-Productivity Machine." MTorres, accessed junho 2017. <http://www.mtorres.es/en/aeronautics/laboratory>.
- NetComposites. 2017. "Infusion Processes." NetComposites, accessed maio 2017. <http://netcomposites.com/guide-tools/guide/manufacturing/infusion-processes/>.
- Niggemann, Young Seok Song, John W. Gillespie, and Dirk Heider. 2008. "Experimental Investigation of the Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion (CAPRI) Process." *Journal of COMPOSITE MATERIALS*, Vol. 42, No. 11/2008.
- Nijssen, R.P.L. 2015. *Composite Materials - An Introduction*. Edited by 1st English edition based on 3rd Dutch edition (ISBN: 978-90-77812-51-8): VKCN.
- Nuplex. 2017. "Resin transfer moulding." accessed maio 2017. <http://www.nuplex.com/composites/processes/resin-transfer-moulding>.
- Potter, K. 1997. *Resin Transfer Moulding*: Chapman & Hall.
- Ridgard, C. 2009. "Out of Autoclave Composite Technology for Aerospace, Defense and Space Structures." Proceedings of the SAMPE 2009 Conference of the Society for the Advancement of Materials and Process Engineering.

- Rudd, C.D., A.C. Long, and K.N. Kendall. 1997. *Liquid Moulding Technologies*: 1st ed. Woodhead Publishing Ltd.
- Scheidegger, A.E. 1974. *The physics of flow through porous media*: University of Toronto Press.
- Shinoda, Tomoyuki, Hiroshi Odani, Eisuke Wadahara, Yasuhiro Komori, and Takashi Shono. 2007. "A-VARTM TECHNOLOGY APPLICATION FOR JAPAN'S NEW REGIONAL JET AIRCRAFT." 16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, Kyoto, Japan.
- Šimáček, Pavel, and Suresh G. Advani. 2004. "Desirable features in mold filling simulations for Liquid Composite Molding processes." *Polymer Composites* 25 (4):355-367. doi: 10.1002/pc.20029.
- Sousa, Diana 2016. "INEGI reúne líderes para debater o futuro em matéria de inovação." <http://noticias.up.pt>
- Trilaksono, and Naoyuki Watanabe. 2014. "Automatic Damage Detection and Monitoring of a Stitch Laminate System Using a Fiber Bragg Grating Strain Sensor." *Open Journal of Composite Materials* Vol.4 No.1. doi: 10.4236/ojcm.2014.41006.
- UDEL. 2017. "Liquid Injection Molding Simulation (LIMS)." accessed maio 2017. <http://sites.udel.edu/lims/>.
- Waldrop, John C. 2008. DOUBLE BAG VACUUM INFUSION PROCESS. edited by The Boeing Company. United States Patent: The Boeing Company.
- Woods, Jack A. 2008. CONTROLLED ATMOSPHERIC PRESSURE RESIN INFUSION PROCESS. edited by The Boeing Company. United States Patent: The Boeing Company
- Yancey, Robert. 2012. "'How Composites are Strengthening the Aviation Industry'." industryweek, accessed Maio 2017. <http://www.industryweek.com/news/how-composites-are-strengthening-aviation-industry>
- Young, Wen-Bin, and Min-Te Chuang. 1995. "Fabrication of T-Shaped Structural Composite through Resin Transfer Molding." *Journal of Composite Materials* 29 (16):2192-2214. doi: doi:10.1177/002199839502901606.

ANEXO A: FICHA DA RESINA UTILIZADA

Tooling & Composites

Product Data Sheet
Version 04 / 2016

Biresin® CR83 Composite resin system

Product Description

Biresin® CR83 is an epoxy resin system with extremely low viscosity designed specifically for the infusion process for the production of high performance fibre reinforced composites parts and moulds. The system has thermal properties up to 80°C. Biresin® CR83 epoxy resin has a low tendency to crystallise.

Application Areas

Biresin® CR83 is especially suited to the infusion and injection processes due to its low viscosity range. It can be used in the marine and general industrial composite areas. Due to its good wetting properties it is particularly suited for use with carbon fibre reinforcement.

Features / Advantages

- 3 hardeners (B) give a wide range of processing times
- The reactivity can be adapted by mixing the hardeners
- Fast infusion and good wet-out of fabrics and non-wovens due to low viscosity and good wetting characteristics even at low temperatures
- All systems Germanischer Lloyd approved, Certificate No. WP 1420017 HH (attached)
- Glass transition temperatures up to 80°C dependent on curing conditions
- Carbon fibres are wet out well by all of the resin systems
- Biresin® CR83 resin (A) has a low tendency to crystallise

Physical Data		Resin (A)		Hardener (B)	
Individual Components		Biresin® CR83	Biresin® CH83-2	Biresin® CH83-6	Biresin® CH83-10
Mixing ratio, parts by	weight	100	30		
Mixing ratio, parts by	volume	100	36		
Colour		translucent	colourless to yellowish		
Viscosity, 25°C	mPa.s	~610	<10	<10	< 10
Density, 25°C	g/ml	1.14	0.95	0.94	0.95
		Mixture			
Potlife, 100 g / RT, approx. values	min		60	180	300
Mixed viscosity, 25°C, approx. values	mPa.s		155	170	155

Processing

- The material and processing temperatures should be in the range 18 - 35°C.
- The mixing ratio must be followed accurately to obtain best results. Deviating from the correct mix ratio will lead to lower performance.
- The final mechanical and thermal values are dependent on the applied postcuring cycles.
- It is recommended to clean brushes or tools immediately after use with Sika Reinigungsmittel 5.
- Additional information is available in "Processing Instructions for Composite Resins".

Biresin® CR83 1 / 4



BUILDING TRUST



ANEXO B: RESULTADOS DOS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Data	Placa	Processo	Plies	Pré Processo		Debulking		Pressão		tempo [min]	Espessura média [mm]	Pós Processo		FVF Aparente
				Massa Empilhamento [g]	Massa	Ciclos	Pressao [mbar]	Resina [mbar]	"Armadiilha" [mbar]			Massa [g]	Densidade [kg/m³]	
23/05/2017	A	Infusão Simples	16	330,7		x	x	Patm	-500	26	3,82	305,7	1748,16	46,89
24/05/2017	B	Infusão Simples	16	301,7		x	x	Patm	-500	23	3,66	307,6	1805,18	48,95
26/05/2017	C	CAPRI	16	309,1		50	-200 / Patm	-200	-700	28	3,66	285,3	1769,40	48,90
30-31/05	D	CAPRI	16	308,1		50	-850 / -150	-500	-850	39	3,46	298,6	1763,34	51,83
05-06/06	E	CAPRI	16	275,9		50	-850 / -150	-500	-850	35	3,3	260,8	1830,38	54,36

ANEXO C: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE QUEIMA

Laminado A

LFF Laboratório de Fumo e Fogo	Determinação de Teores Mássicos Norma ISO 1172-1996
---	--

Provetes:

Requerente:

Requisição:

Data ensaio:

Material:

Provet	Referência	m(cad)/g	m(cad+prov)/g	m(prov)/g	m(cad+fibra)/g	m(fib)/g	m(res)/g	% Res	% Fib
1	A1	28,2727	32,5103	4,2376	31,0804	2,8077	1,4299	33,74	66,26
2	A2	24,8497	29,0917	4,2420	27,6533	2,8036	1,4384	33,91	66,09
3	A3	24,2427	28,5238	4,2811	27,0708	2,8281	1,4530	33,94	66,06
4	A4	22,1850	26,4244	4,2394	25,0084	2,8234	1,4160	33,40	66,60
5	A5	26,7684	30,9426	4,1742	29,5828	2,8144	1,3598	32,58	67,42

	Média	DP
% Resina	33,51	0,57
% Fibra	66,49	0,57

Responsável pelos ensaios

João Rodrigues

Laminado B

LFF Laboratório de Fumo e Fogo	Determinação de Teores Mássicos Norma ISO 1172-1996
--	---

Provetes:

Requerente:

Requisição:

Data ensaio:

Material:

Provet	Referência	m(cad)/g	m(cad+prov)/g	m(prov)/g	m(cad+fibra)/g	m(fib)/g	m(res)/g	% Res	% Fib
1	B1	28,2735	32,5751	4,3016	31,1690	2,8955	1,4061	32,69	67,31
2	B2	24,8506	29,2328	4,3822	27,7882	2,9376	1,4446	32,97	67,03
3	B3	24,2438	28,6197	4,3759	27,1690	2,9252	1,4507	33,15	66,85
4	B4	22,1853	26,5593	4,3740	25,0998	2,9145	1,4595	33,37	66,63
5	B5	26,7689	31,1201	4,3512	29,6762	2,9073	1,4439	33,18	66,82

	Média	DP
% Resina	33,07	0,26
% Fibra	66,93	0,26

Responsável pelos ensaios

João Rodrigues

Laminado C

LFF Laboratório de Fumo e Fogo	Determinação de Teores Mássicos Norma ISO 1172-1996
---	--

Provetes:

Requerente:

Requisição:

Data ensaio:

Material:

Provet	Referência	m(cad)/g	m(cad+prov)/g	m(prov)/g	m(cad+fibra)/g	m(fib)/g	m(res)/g	% Res	% Fib
1	C1	28,2732	32,2492	3,9760	31,0466	2,7734	1,2026	30,25	69,75
2	C2	24,8509	28,8204	3,9695	27,6152	2,7643	1,2052	30,36	69,64
3	C3	24,2435	28,1971	3,9536	27,0093	2,7658	1,1878	30,04	69,96
4	C4	22,1850	26,1490	3,9640	24,9584	2,7734	1,1906	30,04	69,96
5	C5	26,7682	30,7314	3,9632	29,5419	2,7737	1,1895	30,01	69,99

	Média	DP
% Resina	30,14	0,16
% Fibra	69,86	0,16

Responsável pelos ensaios

João Rodrigues

Laminado D

LFF Laboratório de Fumo e Fogo	Determinação de Teores Mássicos Norma ISO 1172-1996
---	--

Provetes: Laminado D

Requerente: Ricardo

Requisição: —

Data ensaio: 20/06/2017

Material: Epóxido/Fibra de Vidro

Provet	Referência	m(cad)/g	m(cad+prov)/g	m(prov)/g	m(cad+fibra)/g	m(fib)/g	m(res)/g	% Res	% Fib
1	D1	28,2728	31,9412	3,6684	30,9908	2,7180	0,9504	25,91	74,09
2	D2	24,8513	28,5546	3,7033	27,5990	2,7477	0,9556	25,80	74,20
3	D3	24,2429	27,9712	3,7283	27,0037	2,7608	0,9675	25,95	74,05
4	D4	22,1844	25,9181	3,7337	24,9475	2,7631	0,9706	26,00	74,00
5	D5	26,7688	30,5086	3,7398	29,5345	2,7657	0,9741	26,05	73,95
6	D6	28,8611	32,5982	3,7371	31,6277	2,7666	0,9705	25,97	74,03

	Média	DP
% Resina	25,95	0,08
% Fibra	74,05	0,08

Responsável pelos ensaios

João Rodrigues

Laminado E

LFF Laboratório de Fumo e Fogo	Determinação de Teores Mássicos Norma ISO 1172-1996
---	--

Provetes:

Requerente:

Requisição:

Data ensaio:

Material:

Provet	Referência	m(cad)/g	m(cad+prov)/g	m(prov)/g	m(cad+fibra)/g	m(fib)/g	m(res)/g	% Res	% Fib
1	E1	28,2732	31,9893	3,7161	31,0319	2,7587	0,9574	25,76	74,24
2	E2	24,8504	28,5421	3,6917	27,5986	2,7482	0,9435	25,56	74,44
3	E3	24,2425	27,9742	3,7317	27,0183	2,7758	0,9559	25,62	74,38
4	E4	22,1846	25,9220	3,7374	24,9585	2,7739	0,9635	25,78	74,22
5	E5	26,7681	30,5167	3,7486	29,5447	2,7766	0,9720	25,93	74,07
6	E6	28,8614	32,5780	3,7166	31,6261	2,7647	0,9519	25,61	74,39
7	E7	20,7270	24,4555	3,7285	23,4944	2,7674	0,9611	25,78	74,22

	Média	DP
% Resina	25,72	0,13
% Fibra	74,28	0,13

Responsável pelos ensaios

João Rodrigues